Г.Х.Геворкян В.Н.Семенов

ЭЛЕКТРО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

на языке БЕЙСИК

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Глава первая. Особенности расчетов на ПЭВМ 7
1.1. БЕЙСИК – язык программирования для ПЭВМ 7
1.2. Режим диалога 9
1.3. Подпрограмма ввода данных 14
Глава вторая. Матричные методы расчета электрических цепей 18
2.1. Введение 18
2.2. Метод контурных токов 20
2.3. Метод узловых потенциалов 43
2.4. Освоение и тестирование программ 60
Глава третья. Расчет цепей методом эквивалентных преобразований 66
3.1. Метод редукции 66
3.2. Подпрограммы эквивалентных преобразований 72
3.3. Автоматизированные методы расчета 79
3.4. Методы тестирования 90
3.5. Частотные характеристики 94
3.6. Длинные линии 102
Глава четвертая. Статистический анализ качества 109
4.1. Метод статистического моделирования 109
4.2. Программы для метода МК 113
4.3. ДСЧ и обработка данных 122
4.4. Примеры применения метода МК 135
Глава пятая. Основные подпрограммы 139
5.1. Решение систем линейных алгебраических уравнений 139
5.2. Действия с комплексными числами 147
5.3. Решение нелинейных уравнений 155
5.4. Подпрограммы для ввода и вывода информации 157
Приложение 1. Пример расчета длинных линий 171
Приложение 2. Программа "Комплексный калькулятор" 172
Список литературы 183

Г.Х.Геворкян В.Н.Семенов

ЭЛЕКТРО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ на языке БЕЙСИК

70 ПРОГРАММ НА ПЕРСОНАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ

МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1989

ББК 31.21
Г27
УДК 621.31:681.3.06

Рецензент канд. техн. наук В.Н. Котляровский

Геворкян Г.Х., Семенов В.Н.

Г27 Электротехнические расчеты на языке БЕЙСИК: 70 программ на персональном компьютере. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 184 с.: ил.
ISBN 5-283-00521-6

Описаны программы расчетов на языке БЕЙСИК в области электротехники и энергетики, методы обработки данных, статистический анализ качества. Для каждой программы приведены ее текст, алгоритм, обращение к ней и способы использования на отечественных микроЭВМ.

Предназначена для инженерно-технических и научных работников-электротехников.

Г $\frac{2202010000\text{-}573}{051(01)\text{-}89}$ 125-89 ББК 31.21

Производственное издание

Геворкян Геворк Хоренович
Семенов Владимир Николаевич

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ НА ЯЗЫКЕ БЕЙСИК
70 программ на персональном компьютере

Редактор *В. В. Краюшкин*
Зав. редакцией *М. П. Соколова*
Редактор издательства *Н. Б. Фомичева*
Художественные редакторы *В. А. Гозак-Хозак, Г. И. Панфилова*
Технические редакторы *Г. Н. Лядухина, Т. Н. Тюрина*
Корректор *С. В. Малышева*

ИБ № 2248

Набор выполнен в издательстве. Подписано в печать с оригинала-макета 18.08.89. Т-15826. Формат 60 x 88 1/16. Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11.27. Усл. кр.-отт. 11,63. Уч.-изд. л. 11,67. Тираж 70000 экз. (1-й завод 1–35 000 экз.). Заказ 6823. Цена 60 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО "Первая Образцовая типография" Государственного комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054, Москва, М-54, ул. Валовая, 28.

ISBN 5-283-00521-6

© Энергоатомиздат, 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ

Когда десять лет назад авторы начали работу по созданию математического обеспечения для мини- и микроЭВМ на языке БЕЙСИК, многие наши коллеги восприняли это как неперспективный шаг, объясняя его любовью к программистской экзотике (особенно если учесть, что разрабатывались не только чисто вычислительные программы для электротехнических задач, но и управляющие программы для систем автоматизации эксперимента). С тех пор положение изменилось кардинально, персональные компьютеры (ПЭВМ) становятся основным инструментом расчета инженера-электрика, а все ПЭВМ имеют интерпретатор с языка БЕЙСИК. Число публикаций по языку огромно, только учебников, монографий, справочников и пособий насчитывается более 200; это число продолжает расти. В нашей стране в дополнение к уже изданным [1–5] планируется только в центральных издательствах выпуск десятка различных учебников и пособий. Таким образом, учебной литературы в ближайшее время будет достаточно, однако остается нерешенной проблема распространения пакетов прикладных программ.

Предлагаемая читателю книга содержит описание и полные тексты программ, предназначенных для проведения наиболее распространенных в инженерной практике расчетов стационарных режимов в электрических цепях с линейными элементами. Нам кажется, что ее целесообразно использовать не только в производственных, но и в учебных целях – для обучения студентов электротехнических специальностей.

И действительно, в настоящее время специалистами обсуждается ворос о том, что использование ПЭВМ приводит к необходимости коренного изменения не только инженерного труда, но и процесса обучения студентов. Возможность диалога – прямого взаимодействия с ПЭВМ повышает наглядность и доступность учебного материала, снижает "математический барьер" между условием и решением задачи, делает более осязаемой и доступной картину физических процессов в электротехнических объектах, и в итоге ускоряется обучение.

Рассмотрим, как осваивать приведенные в книге программы. Они предназначены для расчета электрических цепей ПЭВМ. Читатель должен знать электротехнику в пределах курса ТОЭ, а для освоения метода статистического моделирования (см. гл. 4) достаточно знания обычных вузовских курсов по теории вероятностей и математической статистике.

Читатель должен знать также программирование на языке БЕЙСИК. Для этого достаточно познакомиться с одной из книг, перечисленных в списке литературы, или с пособиями по языку, входящими в состав документации к имеющейся ПЭВМ. Если читатель уже владеет каким-либо алгоритмическим языком высокого уровня, то изучение БЕЙСИКа займет у него всего несколько часов.

Программы, представленные в книге, отлажены и прошли апробацию при решении конкретных задач. Это весьма ответственное утверждение об их надежности (к сожалению, не доказанное строго, а имеющее чисто практическое основание) позволяет нам полагать, что читателю остается лишь ввести выбранную программу с клавиатуры и провести расчет. Однако и этот процесс не так уж прост ввиду большой вероятности субъективных ошибок при вводе и отсутствии достаточного опыта. Поэтому лучше проводить отладку локально, по частям. Для этого после ввода строк, образующих законченный фрагмент, следует придумать небольшой тест, снабдить текст строками с печатью (выводом) результатов и провести проверку введенного фрагмента. Таким образом может быть выявлено большинство ошибок, которые в целой программе выявить, локализовать и исправить намного труднее (известно, что время отладки программ пропорционально квадрату их длины или числа строк).

После локальной проверки следует аналогично отладить отдельные модули, подпрограммы, а затем запустить общий тест. Такими тестами снабжено большинство описанных программ (см. § 2.4 и 3.4). Это позволит оценить работоспособность программы в целом.

Однако на этом работа с программами не завершается. Известно, что на комментарии должно приходиться около трети текста программы и что ". . . отсутствие комментариев – достаточный повод для увольнения программиста" [14]. И тем не менее приводимые листинги имеют минимальные пояснения, а часто лишены их. Это объясняется тем, что мы рассматриваем данную книгу как большой развернутый комментарий к приводимым программам. Пользователю можно рекомендовать, после того как текст будет готов (а еще лучше – в процессе подготовки его по частям), снабжать его подробными комментариями. На это не следует жалеть ни времени, ни памяти ЭВМ. Опыт показывает, что пользователю ПЭВМ зачастую проще и удобнее вывести на дисплей часть текста программы с комментариями и прочесть его, чем обращаться к инструкциям и прочей документации. Развернутые комментарии упрощают работу пользователей, и он сам должен написать их.

Большинство программ снабжено одним вариантом ввода данных (он описан в гл. 1 – ПП 2000), что должно было обеспечить краткость изложения. Однако в зависимости от назначения программ (в частности, при использовании в обучении ввод должен быть более обширным, пространным, диалог развитым) можно написать нужные подпрограммы ввода данных.

В гл. 5 приведен в качестве примера еще один вариант ПП 2000 для ввода данных, однако он подходит не для всех марок ПЭВМ.

Вывод информации также оформлен минимально кратко. Можно рекомендовать сделать более развернутый вывод результатов, снабдив их подробными комментариями, пояснениями, обеспечить протоколы работы таблицами, графиками, облегчающими восприятие результатов вычислений, наконец, добавив запись выходной информации на машинные носители.

Все программы написаны на минимальном подмножестве языка БЕЙСИК, таком, что они могут выполняться на любой версии языка (см. § 1.1) и на любой ЭВМ. Благодаря этому обеспечена, как нам кажется, максимальная транспортабельность описанного математического обеспечения. Недостатком такого подхода является то, что он порождает упрощенность некоторых программных конструкций. Стремление повысить легкость восприятия, читабельность текста также приводили к использованию наиболее простых операторов и процедур. Поэтому, если версия языка БЕЙСИК, реализованная на имеющейся у пользователя ПЭВМ, допускает более сложные, экономные и компактные формы представления отдельных фрагментов, то можно рекомендовать их использовать.

Опыт внедрения описанных в книге программ показывает, что пользователи обычно приспосабливают процедуры ввода-вывода к своим потребностям, уровню квалификации и опыта: сокращается диалог при многовариантных расчетах или, наоборот, он расширяется за счет дополнительных подсказок, инструкций; кроме того, изменяют форму протокола печати результатов, вводят промежуточный вывод на дисплей для контроля за процессом (что позволяет более динамично управлять им), добавляют также графические процедуры (что увеличивает наглядность, доступность и обозримость результатов). При наличии версий БЕЙСИКа, позволяющих записывать несколько операторов в одну строку, можно, использовав эту возможность, сократить длину и ускорить работу программы. Так, например, число строк в программе ПП 2000 из гл. 1, приведенной на с. 14–16 за счет этого может быть сокращено на одну треть.

Если же читателю нужно только одно – не вдаваясь в особенности строения программ, провести расчет конкретной электрической цепи, то можно взять одну из приведенных в гл. 2 и 3 программ с именами, оканчивающимися на 3 или 4 (например, МУП3 или МКТ4), ввести ее в ПЭВМ, протестировать и начать счет.

В рамках одной книги невозможно с одинаковой глубиной и степенью детализации осветить все вопросы применения языка БЕЙСИК при решении задач, стоящих перед инженерами и научными работниками в области электротехники. Эти задачи весьма многообразны: от традиционных расчетов электрических цепей до новейших методов оптими-

зации, от автоматизированных систем управления и САПР до проблем искусственного интеллекта, причем, чем более доступной становится вычислительная техника, тем шире становится область ее применения. Здесь рассматриваются лишь некоторые аспекты применения ПЭВМ, и на выбор тематики, несомненно, оказали влияние и субъективные интересы авторов. Стремление представить в распоряжение читателя набор полностью отлаженных, готовых к использованию программ и превратить читателя в активного пользователя вынудило авторов еще более сократить тематику книги, уменьшить число описываемых методов и алгоритмов расчета. С учетом этих обстоятельств и сформировалось содержание данной книги.

Работа авторов распределена следующим образом: гл. 1–3 написаны совместно Г.Х. Геворкяном и В.Н. Семеновым, гл. 4 – Г.Х. Геворкяном совместно с В.Х. Геворкяном, гл. 5 – В.Н. Семеновым.

Если читатели сочтут возможным сообщить о недостатках, пожеланиях, поделиться опытом своей работы, то авторы с благодарностью учтут это в своей работе. Все замечания просим направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Авторы

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Уважаемый читатель! В Энергоатомиздате подготовлена эталонная дискета с записью всех программ, описанных в книге. Она предназначена для IBM PC совместимых ПЭВМ, диаметр 133 мм, операционная система MSDOS (версия 3,0). Суммарная емкость дискеты 360 кбайт. Тексты программ записаны в кодах ASCII.

По вопросу приобретения копии с этой дискеты обращаться по адресу: 113114, Москва, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат, группа реализации продукции.

Глава первая

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ НА ПЭВМ

1.1. БЕЙСИК — язык программирования для ПЭВМ

Непрерывное развитие технологии производства средств вычислительной техники, обеспечивавшее экспоненциальный рост мощности ЭВМ в направлении к сверх- и супер-ЭВМ, неожиданно привело к диалектическому скачку — появились микропроцессоры, микроЭВМ и ПЭВМ. Их доступность, низкая стоимость аппаратной части, дешевизна машинного времени, легкость обслуживания и интерактивность при эксплуатации привели к существенной переоценке роли ЭВМ. Следствия появления таких машин весьма многообразны в сфере и науки, и техники: они вызывают необходимость изменять технологию расчетов и их децентрализацию, переходить к иному распределению функций во взаимодействии человек — ЭВМ, изменять критерии оценки вычислительных методов и качества программ, разрабатывать новые языки программирования или модифицировать версии старых языков, изменять архитектуру построения ЭВМ, вычислительных сетей и систем. Все это привело к расширению круга задач и появлению нового поколения задач (машинная графика, редактирование текстов, другие нестандартные задачи).

Основным языком высокого уровня на микроЭВМ и ПЭВМ стал БЕЙСИК [1—5]. Созданный первоначально в целях обучения и использования в системах с разделением времени, применявшийся для решения сравнительно простых задач с быстрым получением результатов расчетов [6], БЕЙСИК превратился в настоящее время в некий стандарт языка высокого уровня для персональных ЭВМ. Он обязательно включается в математическое обеспечение всех таких машин, имеется на многих мини-ЭВМ и больших ЭВМ. О его популярности свидетельствует тот факт, что можно насчитать более 300 книг, посвященных различным аспектам программирования на этом языке.

Цель данной книги — способствовать распространению проведения электротехнических расчетов на ПЭВМ. Исходя из желания сделать описываемые программы максимально доступными, было естественно остановить свой выбор на БЕЙСИКе — наиболее распространенном и простом алгоритмическом языке, обладающем повышенной по сравнению с другими языками программирования транспортабельностью (мобильностью) программ [7]. Последнее — следствие простоты, даже примитивности его операторов и структуры. В частности, перенос математи-

ческого обеспечения существенно упрощается вследствие применения в БЕЙСИКе бесформатного ввода-вывода.

Однако более чем двадцатилетнее развитие языка привело к появлению около четырех десятков его версий и диалектов. В одних увеличено число операторов до 120–140 (почти на порядок по сравнению с первоначальной версией), в других введены средства, обеспечивающие программисту возможности, обычно свойственные АССЕМБЛЕРУ, в третьих учитываются многообразные варианты расширения конфигурации машин, дополнительные аппаратные средства. Все это, естественно, уменьшало возможности переноса математического обеспечения с одной ЭВМ на другую.

Авторы ознакомились с большинством известных в стране диалектов БЕЙСИКа, включенных в математическое обеспечение разных типов ЭВМ – серии СМ, АСВТ, ЕС ЭВМ и "Электроника", а также ряда марок отечественных ПЭВМ. Их анализ показал, что можно ограничиться некоторым минимальным подмножеством языка, таким, что оно, с одной стороны, позволяло бы решать достаточно широкий набор задач электротехнических расчетов, а с другой, могло бы быть реализовано на известных версиях для большинства типов ЭВМ при минимальных требованиях к аппаратуре (вычислительным ресурсам).

В качестве операторов ввода-вывода используются только

PRINT, INPUT, READ,

причем, PRINT бесформатный и без указания кода внешних устройств, а INPUT выполняет функцию только ввода, исключены операторы COM, HEX, PEEK, POKE и др. В результате кроме перечисленных операторов ввода-вывода остались лишь DIM, LET, GOTO, IF–THEN, GOSUB, RETURN, FOR–NEXT, END, DEF и функции SIN, COS, LOG, SQR, EXP, TAB, RND, SGN, INT.

С этим минимальным набором программных средств разработаны все программы, описанные в данной книге.

Кроме сокращения списка операторов имеются и другие ограничения, уменьшающие избыточность, обычную как для естественных, так и для искусственных языков; так, например, не используются логические условные переходы, не применяются весьма удобные операторы ON ... THEN, ON ... GO SUB. Во главу угла ставится такой тесно связанный с транспортабельностью программ критерий качества, как читабельность (легкость восприятия). Поэтому для обеспечения понятности и простоты чтения текста не применяется запись нескольких операторов в одной строке, не используются арифметические выражения в операторе печати, строки пишутся по возможности короче, комментарии используются как разделители, а отдельные функциональные блоки описываются в виде подпрограмм и также четко выделяются в тексте. Все это, по нашему мнению, должно упростить чтение, понимание и освоение программ.

По сравнению с языком высокого уровня (ФОРТРАН, ПЛ/1), обычно применяющимся при проведении электротехнических расчетов на больших ЭВМ, БЕЙСИК обладает рядом недостатков: ограниченность длины массивов, отсутствие локальных переменных, слабо развитый аппарат подпрограмм, "маловыразительные" идентификаторы [8], малые возможности для написания структурных программ [9]. Кроме того, программы, закодированные на БЕЙСИКе, обычно транслируются интерпретатором, а не компилятором, это приводит к понижению быстродействия готовых программ в несколько раз, а иногда и на порядок по сравнению с теми же программами, написанными, например, на ФОРТРАНе. Наконец, многие разделяют мнение, что важнейшим препятствием применению БЕЙСИКа в электротехнических расчетах является малый объем оперативной памяти ПЭВМ (обычно 16–32 К). Однако развитие технологии интегральных схем привело к тому, что современные микропроцессоры превосходят процессоры больших ЭВМ, выпускающихся в 60-х годах, уже выпускаются ПЭВМ, сопоставимые по быстродействию и объему оперативной памяти с младшими выпусками ЕС ЭВМ (например, ЕС 1022). Это позволяет считать, что многие отмеченные недостатки языка БЕЙСИК будут сняты поступательным развитием вычислительной техники.

Тем не менее описанные в книге программы разрабатывались так, чтобы их можно было использовать даже на ПЭВМ с минимальным объемом ОЗУ.

1.2. Режим диалога

Работа на микроЭВМ и ПЭВМ в большинстве областей их применения, в том числе и в электротехнике, организуется в диалоговом режиме. Однако особенности и методика организации такого взаимодействия человека с ЭВМ еще недостаточно освещены в отечественной литературе. Поэтому сначала будут рассмотрены общие формы диалога, а затем – особенности ввода-вывода данных в этом режиме. Это позволит в последующих главах не затрагивать вопросы интерактивного взаимодействия и уделять все внимание тем частям программ, которые реализуют непосредственно вычислительные алгоритмы.

Развитие вычислительной техники показало, что наилучшие результаты ее применения достигаются при диалоговом взаимодействии человека с ЭВМ, когда динамично сочетаются эвристические способности человека и жесткая логика машины, когда гибкое мышление и способность человека восполнять недостающую информацию, его умение оперировать неформализованными понятиями дополняются высокой точностью и колоссальной скоростью ЭВМ. Все это приводит к огромному расширению круга решаемых задач и увеличивает число потребителей машинной информации, включая и непрофессиональных пользователей.

Диалог повышает эффективность труда и профессиональных пользователей, особенно если процесс обработки сложен и трудно поддается формальному анализу и описанию (например, многокритериальная оптимизация, обработка изображений и т.п.). В такой ситуации расчет выгоднее вести в диалоговом режиме: оператор, вызывая промежуточные результаты и анализируя на их основе процесс вычислений, имеет возможность вмешаться в него на любой стадии и выбрать в зависимости от сложившегося положения ту или иную численную процедуру, видоизменить расчет, указав иные параметры, и т.п. При этом человек выступает не только как потребитель результатов счета, но и как источник информации для ЭВМ и диспетчер ее работы.

В диалоговом режиме происходит интенсивный обмен информаций – входными, промежуточными и выходными данными – между человеком и ЭВМ. Первые (вырабатываемые человеком для ЭВМ) должны быть полными, точными и легко изменяемыми. Сообщения, выдаваемые ЭВМ в процессе работы (промежуточные результаты), должны содержать указания о ходе расчетов и появившихся ошибок, рекомендации об их исправлении, контрольные результаты. Кроме того, возможны различные запросы, например, о выборе направления счета, в ответ на которые пользователем вводятся необходимые указания. Наконец, выходные данные, вырабатываемые ЭВМ для человека, должны быть краткими, легко обозримыми и воспринимаемыми (например, во многих случаях достаточно выводить числа всего с двумя-тремя значащими цифрами).

Диалоговый режим в настоящее время рассматривается как основная форма общения человека с ЭВМ и широко используется при проведении научно-технических расчетов. Поэтому при разработке программ необходимо иметь в виду не только их алгоритмы и другие вычислительные аспекты, но и набор средств, в полной мере реализующих возможности диалога, в том числе самое большое его преимущество – оперативность взаимодействия. Это повышает производительность труда программистов по данным разных авторов от 50% до нескольких раз по сравнению с пакетным режимом.

Интерактивное взаимодействие осуществляется с целью или сформировать (изменить) алгоритм вычислений, или ввести необходимые для расчета данные. Далее будут приведены примеры таких видов диалога: для первого случая в § 3.3 при описании программы ПРЭСЗ, для второго случая в § 1.3.

Информация, которой обмениваются человек и ЭВМ, может быть закодирована по-разному: а) цифровая машинная информация; б) условная алфавитно-цифровая мнемоника; в) алфавитно-цифровая информация с общенаучной символикой; г) естественный язык. Эта информация может передаваться в виде символов визуальных, звуковых, тактильных и моторных.

Диалог конструируется из отдельных "сеансов связи", которые могут иметь разные формы. В [10] выделено пять форм диалога: естественный язык; команды; меню; стандартные формы; ответы на вопросы. В дальнейшем рассмотрим только четыре из перечисленных форм, исключая естественный язык.

Диалоговые команды применяются при разветвлении программ (когда ответ пользователя интерпретируется и происходит переход на подпрограмму или ветвь основной программы), при вводе небольшого числа исходных данных или для вывода на дисплей напоминаний оператору о необходимых действиях. Например,

```
100 PRINT "ВКЛЮЧИТЕ РЕЛЕ № 4"
110 PRINT "СНИМИТЕ КАССЕТУ"
120 INPUT K
```

В отличие от команд (а также вопросов и напоминаний), дающих мало активности пользователю, другая форма диалога – меню – является альтернативной (выбор из нескольких равноценных вариантов) и более активной. Например, в начале работы системы автоматизации эксперимента целесообразно поместить строки

```
130 PRINT "ВЫБЕРИТЕ И ВВЕДИТЕ КОД РАБОТЫ"
140 PRINT "1 – ОПРОС КАНАЛОВ"
150 PRINT "2 – ОПРОС КАНАЛОВ И УПРАВЛЕНИЕ"
160 PRINT "3 – ОПРОС КАНАЛОВ И ВКЛЮЧЕНИЕ РЕЛЕ"
170 INPUT K
```

которые позволяют оператору выбрать нужный режим ее работы.

При обработке данных можно предложить выбрать ту методику, которая наиболее подходит в данной ситуации:

```
180 PRINT "ВВЕДИТЕ КОД РАБОТЫ"
190 PRINT "ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ–1"
200 PRINT "КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ–2"
210 PRINT "СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ–3"
220 INPUT K
```

Диалоговый режим позволяет решать задачи не по жестко заданной схеме, а более гибко: предусматривается некоторое число вариантов расчета, а порядок действий не фиксируется заранее, он выбирается пользователем. Разработанные в [11] программы машинных экспериментов с моделями радиоэлектронных устройств позволяют в режиме диалога оценить промежуточные результаты, изменить параметры и структуру исследуемой модели, уточнить ход эксперимента во время моделирования.

Наконец, отметим, что меню существенно упрощает использование ЭВМ, позволяя работать непрофессионалам и слабо подготовленным (в области программирования) пользователям, так как им остается лишь выбрать вариант действий и следовать рекомендациям, выдаваемых ЭВМ по ходу выполнения тех или иных процедур.

Еще один вариант диалога – ответы на вопросы – позволяет как вводить исходные данные, так и управлять процессом вычислений.

Для ввода данных применяется и другой вид диалога – заполнение стандартных форм. В этом случае на экран дисплея выдается не только запрос, но и стандартная форма ответа на него – напоминание пользователю, как он должен оформить ответ на данный вопрос.

Диалог рекомендуется оформлять в максимально удобной для пользователя форме без сокращений, условных обозначений, чтобы максимально упростить и ускорить восприятие человеком выводимой на дисплей информации.

При проведении электротехнических расчетов существенное место в диалоге занимает ввод исходных данных. При его проектировании также ставится цель облегчить работу пользователя и свести до минимума допускаемые им ошибки (а они возникают постоянно под действием "машинобоязни" и в условиях дефицита машинного времени, часто мнимого).

Ввод граничных значений частот в программе расчета частотных функций можно оформить так [12]:

```
370 PRINT "ВВЕДИТЕ НАЧАЛЬНУЮ И КОНЕЧНУЮ ЧАСТОТЫ
(ГЦ)"
380 INPUT F1, F2
390 IF F1 ≠ 0 THEN 430
400 PRINT "НЕВЕРНО: F1 = 0"
410 PRINT "ПОВТОРИТЕ ВВОД, ЧТОБЫ F1 > 0"
420 GOTO 370
430 REM ПРОДОЛЖЕНИЕ ВВОДА
```

Таким образом, общая схема ввода данных в диалоге должна быть следующей: а) напоминание (строка 370); б) ввод (строка 380); в) контроль (строка 390); г) "эхо" (строки 400 и 410). Такая организация – с развернутой системой подсказок, диагностических сообщений и напоминаний – сокращает не только время взаимодействия человек – ЭВМ, но и уменьшает объем необходимой технической документации.

Спецификой электротехнических расчетов является необходимость ввода больших массивов исходных данных с повторяющейся структурой. Поэтому наиболее целесообразно организовать их ввод в виде циклически повторяющихся запросов и ответов стандартной формы.

Так, параметры схем можно вводить следующим образом:

```
500 PRINT "ВВЕДИТЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ"
510 FOR I = 1 TO 5
520 PRINT "R(ОМ) L(МГН) C(МКФ)"
530 INPUT R(I), L(I), C(I)
540 NEXT I
```

где каждый раз напоминаются порядок следования физических величин, единицы их измерения и, если необходимо, ограничения.

Массив вводится циклически, затем данные контролируются и запоминаются.

Человек может допускать большое число ошибок при вводе: вероятность искажения отдельно взятого символа достигает 1%. Эти ошибки увеличивают число сбоев, прогонов, понижают достоверность результатов, особенно при моделировании, где получаемые результаты крайне трудно оценить априорно [12, 15]. Важность контроля обусловливает повышенные затраты на его проведение – в некоторых системах он занимает до 30% машинного времени. В простейшем случае применяется эхо-контроль: после ввода массив отображается на дисплее в удобочитаемой форме. Такой подход (с предусмотренной возможностью внесения оперативных исправлений) окупается – позволяет исправить до 50% ошибок. Более сложным является машинный контроль для выявления ошибочных данных и ситуаций с выдачей рекомендаций (подсказок) по исправлению ошибок. Текст подсказки должен быть простым, без условных обозначений, даже общепринятые обозначения лучше расшифровать и пояснить текстом [13–15].

В некоторых развитых версиях БЕЙСИКА можно реализовать ввод исходных данных в виде электронных таблиц, которые существенно упрощает контроль данных, так как повышается их наглядность.

Режим диалога замедляет проведение расчетов, поэтому после приобретения опыта эксплуатации программы можно сократить объем выводимой информации (пояснений, подсказок). При проведении многократного счета (многовариантные расчеты, когда большинство данных об электрических параметрах и топологии остаются неизменными) также целесообразно отказаться от диалогового ввода больших массивов и применять, например, ввод данных с помощью операторов DATA–READ. Оформив их в виде подпрограмм, тщательно проверив и записав на машинный носитель, можно каждый раз вводить их после загрузки программы. Это исключит субъективные ошибки и резко сократит время проведения расчетов.

Описанные примеры построения диалога относились к случаю, когда средством обмена являются алфавитно-цифровые символы, однако интерактивное взаимодействие может быть построено и с использованием также графической информации в качестве средства коммуника-

ции. В технических расчетах широко применяется машинная графика, на долю которой по [9] приходится до 30% объема математического обеспечения. Можно рекомендовать пользователям включить в диалог те графические средства, которые уже имеются на отечественных ПЭВМ [16, 17].

Программы, обеспечивающие диалог, длиннее обычных, а значит, соответственно выше трудоемкость их разработки. Однако развитие вычислительной техники со всей очевидностью выявило, что успех в ее применении сегодня определяется не собственно возможностями этой техники, а способностью человека взаимодействовать с ней [18].

1.3. Подпрограмма ввода данных

При проведении электрических расчетов на ЭВМ диалог наиболее часто используется на этапе введения исходных данных. Последние для задач, описываемых в данной книге (задачи расчета линейных цепей с R-, L- и C-элементами), состоят из номеров узлов схемы, значений параметров пассивных элементов в ветвях и источников ЭДС и токов. Наиболее распространенным подходом является организация ввода в диалоге, когда последовательно вводятся строка за строкой и ими заполняется соответствующий массив.

В качестве одного из вариантов можно использовать для ввода данных ПП 2000. Она предусматривает выполнение трех видов работ (в дальнейшем называемых режимами работы): 1) ввод ориентированного графа (что необходимо для тестирования описываемых в последующих разделах вычислительных программ); 2) ввод данных для расчета на постоянном токе; 3) ввод данных для расчета на переменном токе.

```
1994  REM ***************************************
1995  REM * ПП ВВОДА ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕТВЕЙ *
1996  REM * И ТОПОЛОГИИ СХЕМЫ                   *
1997  REM ***************************************
2000  PRINT "УКАЖИТЕ ВИД РАБОТЫ:"
2002  PRINT "1. ВВОД ТОПОЛОГИИ СХЕМЫ,"
2004  PRINT "2. ВВОД ТОПОЛОГИИ И ПАРАМЕТРОВ ВЕТВЕЙ"
2006  PRINT "   ( ВЕТВИ СОДЕРЖАТ ТОЛЬКО R ),"
2008  PRINT "3. ВВОД ТОПОЛОГИИ И ПАРАМЕТРОВ ВЕТВЕЙ"
2010  PRINT "   ( ВЕТВИ СОДЕРЖАТ ЭЛЕМЕНТЫ R,L,C )."
2012  INPUT N9
2014  PRINT "ВВЕДИТЕ ТАБЛИЦУ ПАРАМЕРОВ СХЕМЫ,"
2016  PRINT "ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПРОНУМЕРОВАВ ЕЕ УЗЛЫ"
2018  PRINT "НЕОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ЦЕЛЫМИ ЧИСЛАМИ"
```

```
2020  PRINT "( НУМЕРАЦИЯ ДОЛЖНА БЫТЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ -"
2022  PRINT "ОТ 0 И ВЫШЕ БЕЗ ПРОПУСКОВ ЧИСЕЛ )."
2024  PRINT "ПРИ ВВОДЕ ОТВЕЧАЙТЕ НА ЗАПРОС"
2026  PRINT "ПРОГРАММЫ, СОДЕРЖАЩИЙ СЛЕДУЮЩИЕ"
2028  PRINT "ОБОЗНАЧЕНИЯ: N1 И N2 - НОМЕРА УЗЛОВ"
2030  PRINT "ВЕТВИ СХЕМЫ, R,L,C - ЗНАЧЕНИЯ"
2032  PRINT "АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, ИНДУКТИВНОСТИ"
2034  PRINT "И ЕМКОСТИ ВЕТВИ СХЕМЫ."
2036  PRINT "ВВОД N1=-1 ПОЗВОЛЯЕТ ИСПРАВИТЬ"
2038  PRINT "ОШИБКУ, ДОПУЩЕННУЮ НА ПРЕДЫДУЩЕМ "
2040  PRINT "ШАГЕ, А N1=-2 ОЗНАЧАЕТ ОКОНЧАНИЕ"
2042  PRINT "ВВОДА."
2044  LET N0=1000
2046  LET N1=1
2048  LET N2=0
2050  PRINT "ВЕТВЬ N";N1
2052  IF N9=3 THEN 2078
2054  IF N9=2 THEN 2066
2056  PRINT "N1,N2=";
2058  INPUT K1,K2
2060  IF K1<0 THEN 2100
2062  LET P[N1,1]=K1+K2/N0
2064  GOTO 2092
2066  PRINT "N1,N2,R=";
2068  INPUT K1,K2,K3
2070  IF K1<0 THEN 2100
2072  LET P[N1,1]=K1+K2/N0
2074  LET P[N1,2]=K3
2076  GOTO 2092
2078  PRINT "N1,N2,R,L,C="
2080  INPUT K1,K2,K3,K4,K5
2082  IF K1<0 THEN 2100
2084  LET P[N1,1]=K1+K2/N0
2086  LET P[N1,2]=K3
2088  LET P[N1,3]=K4
2090  LET P[N1,4]=K5
2092  LET N1=N1+1
2094  LET N2=N2+(K1-N2)*SGN(1+SGN(K1-N2))
2096  LET N2=N2+(K2-N2)*SGN(1+SGN(K2-N2))
2098  GOTO 2050
2100  IF K1=-2 THEN 2108
```

```
2102  IF N1=1 THEN 2050
2104  LET N1=N1-1
2106  GOTO 2050
2108  LET N1=N1-1
2110  PRINT "СХЕМА СОДЕРЖИТ ";N1;" ВЕТВЕЙ."
2112  PRINT "ПЕЧАТЬ ТАБЛИЦЫ ПАРАМЕТРОВ НУЖНА"
2114  PRINT "(1-ДА, 0-НЕТ) ?"
2116  INPUT K
2118  IF K=0 THEN 2154
2120  IF N9=3 THEN 2132
2122  IF N9=2 THEN 2128
2124  PRINT "N1.N2"
2126  GOTO 2134
2128  PRINT "N1.N2","R"
2130  GOTO 2134
2132  PRINT "N1.N2","R","L","C"
2134  PRINT "------------"
2136  FOR K=1 TO N1
2138  IF N9=3 THEN 2150
2140  IF N9=2 THEN 2146
2142  PRINT P[K,1]
2144  GOTO 2152
2146  PRINT P[K,1],P[K,2]
2148  GOTO 2152
2150  PRINT P[K,1],P[K,2],P[K,3],P[K,4]
2152  NEXT K
2154  RETURN
```

Программа состоит из трех частей. Первая (строки 2000–2042) отображает на дисплей краткую инструкцию пользователю. Вторая часть (строки 2044–2108) осуществляет диалоговый ввод номеров узлов и параметров ветвей цепи. Третья часть позволяет распечатать в целях контроля введенную информацию в виде таблицы. В соответствии с инструкцией до начала работы с ПП необходимо пронумеровать узлы электрической цепи и выбрать направление тока в ветвях. Положительное направление принимается от узла, номер которого указывается при вводе первым, к узлу, номер которого вводится вторым. Для обеспечения работоспособности программ и успешного тестирования правила инструкции должны строго выполняться.

Физические величины вводятся только в следующих единицах – Ом, Гн, Ф. Данные набираются последовательно в соответствии с подсказкой, выдаваемой на каждом шаге на дисплей.

При режиме 3, например, следует на запрос

ВЕТВЬ 6

N1, N2, R, L, C?

ввести для ветви № 6, соединяющей узлы 17 и 5, имеющей направление тока в этой ветви от узла 17 к узлу 5 и включающей в себя активное сопротивление R = 0,13 Ом, индуктивность L = 0,01 Гн и емкость C = 17 мкФ, следующую последовательность:

17,5,0.13,0.01,1.7E–5

Примеры ответов на запросы ПП можно найти также в протоколах работы тех программ, которые описываются в гл. 2.

Введенные данные размещаются в двухмерном массиве P, который следует описать (оператором DIM) в головной программе, вызывающей ПП 2000. Номера узлов (N1, N2) в упакованном виде размещаются в первом столбце массива. Упаковка состоит в том, что два целых неотрицательных числа (номера узлов) представляются в виде одного десятичного числа, целая часть которого равна 1, а дробная равна 2×10^{p}, где p = 1, 2, 3, . . . , а 10^{p} называется параметром упаковки (его идентификатор – N0). В листинге ПП 2000 принято p = 3, N0 = 1000.

Следующие столбцы массива P занимают величины R, L, C. Поэтому при работе в режиме 1 массив P описывается строкой

1 DIM P(N1,1)

для режима 2 строкой

1 DIM P(N1,2)

и для режима 3 строкой

1 DIM P(N1,4)

В указанные строки вместо N1 следует подставить конкретное значение числа ветвей анализируемой схемы. В последующих разделах можно найти ряд примеров описания массива P для некоторых программ.

Помимо массива P выходная информация, вырабатываемая ПП 2000, содержит упаковочный параметр N0, числа ветвей N1 и номер наибольшего узла N2.

Во время диалога возможно исправление случайно допущенных ошибок. Для этого следует на очередной запрос ввести –1 вместо N1, а остальные величины – указать произвольно, например, равными нулю. В результате этого ЭВМ выдаст запрос на ввод предыдущей строки, что позволит исправить ошибку.

Работа ПП 2000 завершается по инициативе пользователя вводом –2 вместо N1 в ответе на очередной запрос.

ПП 2000 является стандартной для всех описанных в данной книге программ расчета электрических цепей. Вместе с тем для пользователя, уже приобретшего достаточный опыт работы с этими программами, возможно простейшее ее усовершенствование: вставив строку

```
2013  G0 T0 2044
```

можно ускорить ввод, исключив отображение инструкции на экран. В зависимости от особенностей применения возможны и иные способы усовершенствования этой ПП.

В заключение отметим, что хотя ПП 2000 используется в большинстве программ, приведенных в гл. 2 и 3 данной книги, ее следует рассматривать лишь как один из простых вариантов реализации многочисленных возможных проблемно-ориентированных диалоговых систем.

Более сложный вариант программы ввода данных, основанный на идее заполнения таблиц, приведен в § 5.4.

Глава вторая

МАТРИЧНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

2.1. Введение

Наиболее распространенной задачей в электротехнике, требующей применения вычислений на ЭВМ, по-видимому, является расчет линейных электрических цепей.

Проектирование, изготовление и эксплуатация электротехнических устройств, аппаратов, машин и электрических систем требуют проведения расчета и анализа стационарных режимов их работы, что зачастую сводится к расчету цепей с линейными элементами. Однако и исследование переходных процессов в электрических устройствах и системах требует знания характеристик установившихся режимов, которые в этом случае выступают как исходные данные для расчета динамических параметров и анализа протекающих во времени процессов. С этой целью применяется эквивалентирование системы — представление ее многополюсником — линейной электрической схемой с комплексными сопротивлениями и источниками ЭДС [19]. Полученная схема замещения рассчитывается по известным методам, и находятся проводимости и сопротивления, токи и мощности, протекающие через узлы схемы, и т.п. Анализ поведения цепи в частотной области также может быть сведен в ряде случаев к расчету линейных схем. А линеаризация и кусочно-линейная аппроксимация характеристик нелинейных элементов (прием, широко применяющийся при различных расчетах) еще более расширяют область использования подобных вычислений.

Проблеме расчета электрических цепей на ЭВМ посвящена обширная литература, список которой насчитывает не один десяток публикаций.

В этих работах рассмотрены разнообразные вычислительные алгоритмы и описаны программы для проведения широкого круга расчетов линейных и нелинейных цепей, установившихся и переходных процессов в них (укажем лишь несколько книг [20–24]). Опубликованы программы на АЛГОЛе и ФОРТРАНе, во многих изданиях публиковались многочисленные программы на БЕЙСИКе для расчетов с использованием мини- и микроЭВМ, на микрокалькуляторах.

Имеется и книга [25], целиком посвященная решению электротехнических задач с помощью программ на языке БЕЙСИК для программируемых калькуляторов. Программы на БЕЙСИКе для ПЭВМ, относящиеся к некоторым частным случаям расчета цепей, приведены в [67], а в [68] есть также программы для анализа цепей с нелинейными элементами и расчета переходных процессов. Однако в отличие от распространенных программ на языках ФОРТРАН, ПЛ/1 и других, образующих весьма сложные системы математического обеспечения – крупные пакеты прикладных программ, охватывающие весьма широкий спектр электротехнических задач, публикации о программах на БЕЙСИКе носят разрозненный, частный характер, а программы недостаточно универсальны и мобильны.

В данной главе описаны алгоритмы и программы на языке БЕЙСИК для расчета линейных электрических цепей с использованием методов контурных токов (КТ) и узловых потенциалов (УП). Оба метода (особенности применения, алгоритмы, вопросы точности и пр.) достаточно подробно освещены в учебной и научной литературе [26–28], так же как и операции с матрицами, и в дальнейшем о них приводятся лишь те сведения, которые необходимы для понимания программ.

В целях упрощения и облегчения освоения программ сначала описываются программы для расчета на постоянном токе, а затем они модифицируются и дополняются для проведения расчетов на переменном токе.

Оба метода основаны на применении матричной алгебры и даются в двух вариантах – с использованием матричных операторов БЕЙСИКа и без них. Такой подход представляется целесообразным, так как упрощается изложение алгоритма расчета: в простейшем случае – для расчета на постоянном токе – программа, записанная с матричными операторами, представляет собой как бы конспективное переложение формул, прямо отражающих методику вычислений. Однако такие операторы имеются не во всех версиях БЕЙСИКа, поэтому приводятся также программные тексты без матричных операторов.

Алгоритмы программ для реализации методов КТ и УП имеют много общего, что позволяет выделить ряд подпрограмм, используемых в обоих случаях, а структуру программ построить единообразно, применив единые обозначения массивов и одинаковую структуру данных.

Подпрограммы обозначаются ПП ⟨НС⟩, где НС – номер первой строки этой ПП. Обращение к ним (вызов ПП) производится стандартным для языка БЕЙСИК способом: GOSUB ⟨НС⟩.

Расчет любой электрической схемы начинается с рассмотрения ее топологии, подготовки исходных данных (часто эта процедура выполняется вручную и требует дополнительных трудозатрат), а затем следует ввод в ПЭВМ исходной информации. Описанная в гл. 1 ПП 2000 для ввода данных о топологии и параметров ветвей применима во всех программах, описанных в гл. 2 и 3. Для ее использования следует в нужном месте вставить обращение GOSUB 2000. Такой подход достаточно удобен, однако не исключает возможности использования иной ПП, разработанной с учетом специфики решаемых задач и квалификации пользователя. В частности, при многовариантном расчете целесообразно данные считывать оператором READ, записав их в текст программы с помощью оператора DATA и восстанавливая его счетчик оператором RESTORE после каждого считывания. При использовании в учебных целях рекомендуется расширить диалог, увеличив количество указаний, рекомендаций и сообщений, введя промежуточную печать и добавив развитую систему контроля как исходной, так и промежуточной информации.

Общность программ, приведенных в § 2.2 и 2.3 (одинаковый математический аппарат, унифицированная структура программ и единообразное оформление данных), позволяет применять также и единую методику проверки их работоспособности. Для тестирования применяются расчеты топологически эквивалентных схем (см. рис. 2.1 и 2.2) с одинаковым набором исходных данных. Это позволяет сопоставлять результаты расчета, полученные методами КТ и УП на постоянном (соответственно – на переменном) токе. Более подробно о тестировании см. в § 2.4.

2.2. Метод контурных токов

▼ Метод КТ основан на втором законе Кирхгофа (законе напряжений) для независимых контуров. В предположении, что цепь не содержит источников тока или последние заменены эквивалентными источниками ЭДС [26–29], он записывается в виде матричного соотношения

$$(\mathbf{SRS}^{\mathrm{T}})\mathbf{X} = \mathbf{SU} \qquad (2.1)$$

где $\mathbf{S}$ – матрица контуров (матрица инциденций), описывающая связь с контурами; $\mathbf{R}$ – диагональная матрица сопротивлений ветвей; $\mathbf{S}^{\mathrm{T}}$ – транспонированная матрица $\mathbf{S}$; $\mathbf{X}$ – вектор контурных токов; $\mathbf{U}$ – вектор источников ЭДС ветвей.

Из (2.1) можно найти неизвестные токи в контурах, а по ним – токи в ветвях. При условии, что элементы матрицы $\mathbf{R}$ не зависят от токов, выражение (2.1) представляет собой систему линейных уравнений. Введем обозначение для матрицы коэффициентов системы

$$\mathbf{A} = \mathbf{SRS}^{\mathrm{T}} \qquad (2.2)$$

и столбца свободных членов (вектора ЭДС контуров)

$$\mathbf{C} = \mathbf{SU}. \tag{2.3}$$

Тогда с учетом этих обозначений (2.1) запишется в виде

$$\mathbf{AX} = \mathbf{C}. \tag{2.4}$$

Его решение имеет вид

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{C}. \tag{2.5}$$

Для получения токов в ветвях (вектор **Z**) достаточно умножить **X** слева на транспонированную матрицу инциденций (матрицу контуров):

$$\mathbf{Z} = \mathbf{S}^{\mathrm{T}}\mathbf{X}. \tag{2.6}$$

▼ Соотношения (2.2) – (2.5) определяют общую схему расчета по методу КТ и могут быть непосредственно записаны в виде последовательности матричных операторов на языке БЕЙСИК:

```
1150 MAT T = TRN(S)
1160 MAT G = S * R
1170 MAT A = G * T
1180 MAT C = S * U
1190 MAT E = INV(A)
1200 MAT X = E * C
1210 MAT Z = T * X
```

где **G** и **E** – вспомогательные матрицы для хранения промежуточных результатов.

Строки 1150–1180 подготавливают матрицу системы и столбец свободных членов, строкой 1190 матрица обращается, затем находятся токи в контурах (строка 1200) и в ветвях (строка 1220).

Чтобы получить всю программу целиком, следует к приведенному фрагменту добавить описание массивов, блок ввода исходных данных, операторы подготовки матрицы инциденций и вывод результатов расчета.

Прежде, чем описывать недостающие части программы, обратимся к примеру – схеме, изображенной на рис. 2.1. Это позволит излагать материал более конкретно. Данная схема имеет шесть ветвей с включенными в них сопротивлениями, один источник ЭДС и три независимых контура.

Точный подсчет числа ветвей и контуров необходим, так как при использовании матричных операторов требуется точно указать размерности всех массивов. В общепринятых версиях БЕЙСИКа не допускается неявное описание размерности массивов следующим образом:

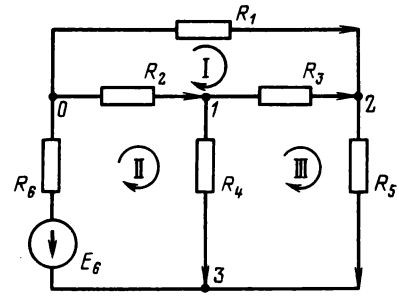


Рис. 2.1. Тестовая схема для расчета по методу контурных токов

```
1000 DIM R(K, K), U(K), Z(K)
1010 DIM S(L, K), T(K, L), G(L, K)
1020 DIM A(L, L), E(L, L), C(L), X(L)
```

где K – число ветвей схемы; L – число независимых контуров, подсчитываемое по формуле L = K – M + 1 (M – число узлов схемы). Поэтому в данном случае для расчета конкретной схемы, изображенной на рис. 2.1, следует в строки 1000–1020 подставить вместо K и L соответственно 6 и 3:

```
1000 DIM R(6,6), U(6), Z(6)
1010 DIM S(3,6), T(6,3), G(3,6)
1020 DIM A(3,3), E(3,3), C(3), X(3)
```

Важное значение имеет методика составления матрицы инциденций, рассмотрение которой проведем на примере схемы, изображенной на рис. 2.1.

Вначале следует выбрать положительные направления токов в ветвях, выделить независимые контуры и установить направления их обхода (задать положительное направление контурных токов). На схеме принятые направления изображены стрелками. Матрица инциденций заполняется по следующему правилу: каждый ее элемент S_{ij}, соответствующий i-й строке (i-му контуру) и j-му столбцу (j-й ветви), равен:

$$S_{ij} = \begin{cases} 0, \text{ если } j\text{-я ветвь не входит в } i\text{-й контур;} \\ 1, \text{ если направление тока в ветви совпадает с направлением тока в контуре;} \\ -1, \text{ если эти токи противоположны.} \end{cases}$$

Матрица инциденций рассматриваемого примера соответствует табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ контура	№ ветви					
	1	2	3	4	5	6
I	1	−1	−1	0	0	0
II	0	1	0	1	0	−1
III	0	0	1	−1	1	0

Вторая строка ее, например, отражает тот факт, что во второй контур не входят ветви 1, 3, 5, ток в ветвях 2 и 4 совпадает с принятым направлением контурного тока, а в шестой ветви имеет противоположное направление.

Составленную таким образом матрицу инциденций можно при расчете ввести в процессе диалогового взаимодействия, однако и можно записать ее в оператор DATA и заполнять массив *S* во время вычислений. Последнее имеет свои преимущества. Опишем этот вариант:

```
1110 DATA 1,–1,–1,0,0,0
1120 DATA 0,1,0,1,0,–1
1130 DATA 0,0,1,–1,1,0
1140 MAT READ S
```

Следующим шагом является подготовка диагональной матрицы – матрицы сопротивлений ветвей. Она в нашем случае имеет размерность 6 x 6, диагональные элементы ее равны сопротивлениям ветвей. Последние удобнее вводить оператором READ в виде вектора и саму матрицу сформировать во время проведения расчетов:

```
1040 MAT READ Z
1050 MAT R =ZER
1060 FOR I = 1 T0 6
1070 LET R(I,I) = Z(I)
1080 NEXT I
```

Необходимо также задать компоненты вектора ЭДС ветвей, для чего достаточно двух строк:

```
1100 MAT U = ZER
1110 LET U(6) = 10
```

так как источник ЭДС имеется только в шестой ветви.

Объединив все части в одну программу и добавив простой вывод результатов, получим приведенный ниже полный текст программы МКТ0.

```
900  REM ****************************************
902  REM * РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ   *
904  REM * КОНТУРНЫХ ТОКОВ. ПОСТОЯННЫЙ ТОК.    *
906  REM * МАТРИЧНЫЕ ОПЕРАТОРЫ БЕЙСИКА.        *
908  REM * НАЗВАНИЕ: "МКТО".                   *
910  REM ****************************************
1000  DIM R[6,6],U[6],Z[6]
1010  DIM S[3,6],T[6,3],G[3,6]
1020  DIM A[3,3],E[3,3],C[3],X[3]
1030  DATA 6,2,1,5,4,3
1040  MAT  READ Z
1050  MAT R=ZER
1060  FOR I=1 TO 6
1070  LET R[I,I]=Z[I]
1080  NEXT I
1090  MAT U=ZER
1100  LET U[6]=10
1110  DATA 1,-1,-1,0,0,0
1120  DATA 0,1,0,1,0,-1
1130  DATA 0,0,1,-1,1,0
1140  MAT  READ S
1150  MAT T=TRN(S)
1160  MAT G=S*R
1170  MAT A=G*T
1180  MAT C=S*U
1190  MAT E=INV(A)
1200  MAT X=E*C
1210  MAT Z=T*X
1220  PRINT "ТОКИ В ВЕТВЯХ"
1230  MAT  PRINT Z
1240  END
```

Остается произвести расчет. Запустим программу и по окончании вычислений получим:

```
ТОКИ В ВЕТВЯХ
-.413223
-1.05785
-.363636
-.694215
-.776859
 1.47107
```

Недостатком составленной программы является необходимость подготовки вручную матрицы инциденций, что для сложных схем представляется достаточно трудоемкой процедурой. Трудности возрастают с ростом размерности схем (а на практике обычными являются задачи с числом узлов более 100), что приводит к увеличению числа ошибок. Определенные сложности возникают и при расчете непланарных схем, которым соответствуют непланарные графы (т.е. графы, которые не размещаются на плоскости без самопересечений).

В связи с этим разрабатываются алгоритмы и программы для автоматизации составления матриц инциденций. Решение этой проблемы, описанное ниже, накладывает некоторые ограничения на свойства графов, задающих топологию анализируемых цепей: такой граф должен быть связным (т.е. в нем всегда должен существовать путь между двумя произвольными его вершинами, и у него должны отсутствовать висячие вершины (степень вершины не должна быть меньше 2). Можно, видимо, полагать, что встречающиеся в практических расчетах электрические цепи удовлетворяют этим требованиям и принятие этих ограничений не уменьшает общность изложенного далее алгоритма.

Процесс автоматизированного построения матрицы инциденций состоит из двух этапов – построение дерева и нахождение независимых (главных) контуров в схеме.

Дерево – это система ветвей, связывающих все узлы (вершины графа) без образования контуров [29]. При его построении сначала выбирается произвольный узел (корень дерева) и заносится в список вершин. Затем находится очередной узел, находящийся от первого на расстоянии не более одной ветви, и также заносится в список. Если таких узлов несколько, то их выбор произволен. Следующий шаг повторяет предыдущую процедуру, если еще имеются узлы, не занесенные в список и являющиеся смежными с последним по счету узлом (из занесенных в список). Остановка этого процесса составления списка не означает завершения построения дерева, соответствующего данному графу, поскольку в списке могут отсутствовать некоторые узлы. Если такие узлы имеются, то описанная процедура повторяется. Признаком завершения процедуры является включение всех узлов в дерево.

Второй этап – нахождение независимых контуров – производится по следующему алгоритму: выбирается произвольная не вошедшая в дерево хорда и выбирается путь, связывающий узлы выбранной хорды и проходящий целиком по дереву. Для этого берется одна из вершин хорды и перебираются узлы дерева в сторону его корня. После этого берется вторая вершина хорды, и также фиксируется путь от нее к корню дерева. Из объединения полученных двух путей и хорды, а затем последующего исключения повторяющихся ребер и формируется контур схемы. Процесс этот реализуется для каждой следующей хорды и завершается после перебора всех хорд. В результате получается совокупность независимых контуров данной схемы.

Выбор положительного направления токов в ветвях определяется в соответствии со следующим правилом. Поскольку при вводе данных с помощью ПП 2000 (см. гл. 1) ветвь задается номерами двух узлов N1 и N2, то за положительное направление тока принимается направление от N1 к N2. А направление контурных токов однозначно определяется описанной выше процедурой построения самого контура.

После выделения контуров и направлений токов заполнение матрицы инциденций производится по обычной методике.

Разработанная по описанному алгоритму программа не требует дополнительной информации и дополнительной оперативной памяти, кроме той, что выделена под массив, где хранятся номера смежных пар узлов. Она оптимизирована по быстродействию. Текст ее оформлен в виде подпрограммы ПП 3000.

```
2902  REM  ****************************************
2904  REM  * ПП ФОРМИРОВАНИЯ МАТРИЦЫ ИНЦИДЕНЦИЙ    *
2906  REM  * ДЛЯ РАСЧЕТА ПО МЕТОДУ КОНТУРНЫХ ТОКОВ. *
2908  REM  ****************************************
3000  DEF FNA(A)=INT(ABS(A))
3002  DEF FNB(B)=INT((ABS(B)-FNA(B))*NO+.5)
3004  DEF FNC(C)=FNA(C)*SGN(C)
3006  DEF FND(D)=SGN(SGN(D)+.5)
3100  LET N3=N1-N2
3102  FOR K=1 TO N3
3104  FOR K1=1 TO N1
3106  LET S[K,K1]=0
3108  NEXT K1
3110  NEXT K
3112  FOR K=1 TO N1
3114  LET K1=FNA(P[K,1])
3116  LET S[1,K1+1]=S[1,K1+1]+1
3118  LET K1=FNB(P[K,1])
3120  LET S[1,K1+1]=S[1,K1+1]+1
3122  NEXT K
3124  LET K1=0
3126  LET K2=FNA(P[1,1])
3128  GOTO 3178
3130  FOR K=1 TO N1
3132  LET K3=P[K,1]
3134  IF K3<0 THEN 3142
3136  IF (FNA(K3)-K2)*(FNB(K3)-K2)#0 THEN 3142
3138  LET K4=FNA(K3)+FNB(K3)-K2
```

```
3140  IF FNC(S[1,K4+1])>0 THEN 3168
3142  NEXT K
3144  LET S[1,K2]=FNB(S[1,K2])/N0
3146  FOR K=1 TO K1
3148  LET K3=FNB(S[1,K])
3150  LET K2=FNA(P[K3,1])
3152  IF FNC(S[1,K2+1])<0 THEN 3164
3154  LET K2=FNB(P[K3,1])
3156  IF FNC(S[1,K2+1])<0 THEN 3164
3158  NEXT K
3160  PRINT "СХЕМА ИМЕЕТ НЕСВЯЗНЫЙ ГРАФ."
3162  STOP
3164  LET S[2,K1]=(K+1)/N0
3166  GOTO 3178
3168  LET P[K,1]=-P[K,1]
3170  LET K1=K1+1
3172  LET K3=S[1,K1]
3174  LET S[1,K1]=(FNA(K3)+K/N0)*FND(K3)
3176  LET K2=K4
3178  LET S[1,K2+1]=1-ABS(S[1,K2+1])
3180  IF K1<N2 THEN 3130
3182  FOR K=1 TO N2+1
3184  LET S[1,K]=FNB(S[1,K])/N0
3186  NEXT K
3188  LET K1=1
3190  FOR K2=1 TO N3
3192  FOR K=K1 TO N1
3194  IF P[K,1]>0 THEN 3198
3196  NEXT K
3198  LET K1=K+1
3200  LET K3=P[K,1]
3202  LET K4=FNA(K3)
3204  FOR K5=1 TO 2
3206  IF K4=FNA(P[1,1]) THEN 3246
3208  FOR K6=1 TO N2
3210  LET K7=FNB(S[1,K6])
3212  LET K8=P[K7,1]
3214  IF (K4-FNA(K8))*(K4-FNB(K8))=0 THEN 3220
3216  NEXT K6
3218  GOTO 3246
3220  LET K0=FND(-ABS(K4-FNA(K8)))*SGN(K5-1.5)
```

```
3222  LET K4=FNA(K8)+FNB(K8)-K4
3224  LET K9=S[K2,K7]
3226  LET KO=FNC(K9)+KO
3228  LET S[K2,K7]=KO+FNB(K9)*FND(KO)/NO
3230  LET K6=K6-1
3232  IF K6=0 THEN 3246
3234  IF N3=1 THEN 3240
3236  LET K6=K6+(FNB(S[2,K6])-K6-1)*SGN(FNB(S[2,K6]))
3238  IF K6=0 THEN 3246
3240  LET K7=FNB(S[1,K6])
3242  LET K8=P[K7,1]
3244  GOTO 3220
3246  LET K4=FNB(K3)
3248  NEXT K5
3250  LET S[K2,K]=1+FNB(S[K2,K])/NO
3252  NEXT K2
3254  FOR K=1 TO N1
3256  LET P[K,1]=ABS(P[K,1])
3258  LET S[1,K]=FNC(S[1,K])
3260  IF N3=1 THEN 3264
3262  LET S[2,K]=FNC(S[2,K])
3264  NEXT K
3266  RETURN
```

Входной информацией для ПП 3000 является массив параметров ветвей P, подготовливаемый в ПП 2000, а также число ветвей (в программе оно обозначено N1), номер наибольшего узла схемы (N2) и упаковочный параметр (N0). О структуре массива P и назначении прочих упомянутых переменных см. описание ПП 2000 (гл. 1).

По окончании работы ПП 3000 в двухмерном массиве S размерностью N3 × N1 располагается матрица инциденций. (Отметим, что N3 – число контуров – определяется в процессе счета.)

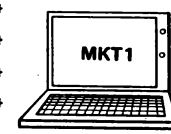
Если граф рассматриваемой схемы является несвязным, то выдается соответствующее сообщение и вычисления прекращаются.

▼ Рассматривая программу МКТ0, можно наметить еще один путь ее усовершенствования: заменить ввод данных с помощью операторов READ–DATA на диалоговый режим ввода, что обеспечивает большую ее гибкость и универсальность. Такой ввод можно организовать, используя ПП 2000. Однако для этого нужно внести соответствующие изменения в текст МКТ0.

Вместо строк 1030–1140 надо написать

```
1030 GOSUB 2000
1040 GOSUB 2500
1050 GOSUB 3000
1110 MAT R = ZER
1120 FOR K = 1 T0 N1
1130 LET R(K,K) = P(K,2)
1140 NEXT K
```

Строка 1140 содержит обращение к ПП 2500, в которой вводятся ЭДС ветвей. А строки 1110–1140 полностью аналогичны по содержанию строкам 1050–1080 программы МКТ0, так как во втором столбце массива P записываются активные сопротивления ветвей (см. описание ПП 2000). После внесения этих изменений получаем программу МКТ1, полный текст которой приведен ниже. Для проведения расчетов нужно загрузить в ЭВМ с машинных носителей (или ввести с клавиатуры) подпрограммы автоматического составления матриц инциденций (ПП 3000) и ввода данных (ПП 2000).




```
900  REM ******************************************
902  REM * РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ      *
904  REM * КОНТУРНЫХ ТОКОВ. ПОСТОЯННЫЙ ТОК .     *
906  REM * МАТРИЧНЫЕ ОПЕРАТОРЫ БЭЙСИКА .         *
908  REM * НАЗВАНИЕ: "МКТ1".                     *
910  REM ******************************************
1000  DIM P[6,2],R[6,6],U[6],Z[6]
1010  DIM S[3,6],T[6,3],G[3,6]
1020  DIM A[3,3],E[3,3],C[3],X[3]
1021  REM------
1022  REM ВВОД СОПРОТИВЛЕНИЙ ВЕТВЕЙ
1023  REM И ТОПОЛОГИИ СХЕМЫ
1024  REM------
1030  GOSUB 2000
1031  REM------
1032  REM ВВОД ИСТОЧНИКОВ ЭДС ВЕТВЕЙ
1033  REM------
1040  GOSUB 2500
1041  REM------
1042  REM ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ИНЦИДЕНЦИЙ
1043  REM------
1100  GOSUB 3000
1101  REM------
```

```
1102  REM ФОРМИРОВВАНИЕ МАТРИЦЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ
1103  REM ВЕТВЕЙ
1104  REM------
1110  MAT R=ZER
1120  FOR K=1 TO N1
1130  LET R[K,K]=P[K,2]
1140  NEXT K
1141  REM------
1142  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ МАТРИЦЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ
1143  REM КОНТУРОВ
1144  REM------
1150  MAT T=TRN(S)
1160  MAT G=S*R
1170  MAT A=G*T
1171  REM------
1172  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЕКТОРА
1173  REM Э Д С  КОНТУРОВ
1174  REM------
1180  MAT C=S*U
1181  REM------
1182  REM ОБРАЩЕНИЕ МАТРИЦЫ
1183  REM СОПРОТИВЛЕНИЙ КОНТУРОВ
1184  REM------
1190  MAT E=INV(A)
1191  REM------
1192  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ КОНТУРНЫХ ТОКОВ
1193  REM------
1200  MAT X=E*C
1201  REM------
1202  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ ТОКОВ В ВЕТВЯХ
1203  REM------
1210  MAT Z=T*X
1211  REM------
1212  REM ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ
1213  REM------
1500  GOSUB 1700
1510  STOP
1670  REM ************************************
1680  REM * ПП ПЕЧАТИ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ В ВЕТВЯХ *
1690  REM ************************************
```

```
1700  PRINT "ТОКИ В ВЕТВЯХ :"
1710  MAT  PRINT Z
1720  RETURN
2460  REM ********************************
2470  REM * ВВОД ИСТОЧНИКОВ ПОСТОЯННОГО *
2480  REM * НАПРЯЖЕНИЯ ВЕТВЕЙ            *
2490  REM ********************************
2500  MAT U=ZER
2510  LET U[6]=10
2520  RETURN
9999  END

READY
```

В качестве примера возьмем схему, изображенную на рис. 2.1. Отметим, что в ветвях, содержащих источники ЭДС (в данном случае – это ветвь 6), внутреннее сопротивление источника ЭДС должно быть объединено с активным сопротивлением резистора, имеющегося в данной ветви. В дальнейшем будем полагать, что эта процедура всегда уже выполнена. Пронумеруем ветви и узлы и составим табл. 2.2.

Таблица 2.2

№ ветви	№ узлов		R, Ом	E, В	№ ветви	№ узлов		R, Ом	E, В
1	0	2	6	0	4	1	3	5	0
2	0	1	2	0	5	2	3	4	0
3	1	2	1	0	6	0	3	3	10

Запускаем программу на выполнение, выбрав режим № 2, так как расчет ведется на постоянном токе. Далее, отвечая на последовательные запросы программы, вводим в соответствии с табл. 2.2 следующие данные:

```
0,2,6
0,1,2
1,2,1
1,3,5
2,3,4
0,3,3
-2,0,0
```

Последняя строка содержит признак окончания ввода данных (см. описание ПП 2000 в предыдущей главе). После этого ЭВМ выполняет расчет и выводит значения токов в ветвях, приведенные на с. 24.

▼ Хотя матричные операторы придают программным текстам краткость и наглядность, однако они обладают двумя недостатками. Во-первых, при их использовании следует строго следить за соответствием размерностей, например, перемножаемых матриц. Во-вторых, требуется описывать и выделять память под дополнительные массивы для хранения промежуточных результатов – тоже матриц. Поэтому программы с матричными операторами обладают недостаточной гибкостью, универсальностью и эффективностью. Наконец, такие операторы имеются не во всех версиях языка БЕЙСИК. В связи с этим возникает необходимость дать другой вариант программы расчета электрической схемы – без использования матричных операторов.

В новой программе (МКТ2) сохраним обозначения и последовательность отдельных этапов расчета, использованные в программе МКТ1, сократив благодаря этому объем дополнительных замечаний и пояснений. В качестве примера снова рассмотрим расчет схемы на рис. 2.1 на постоянном токе.

Просматривая текст программы МКТ1, будем заменять действия с матричными операторами соответствующими фрагментами, которые выполняют эквивалентные операции. В ряде случаев, как это будет отмечено далее, открываются некоторые возможности усовершенствовать текст программы в целях повышения ее эффективности.

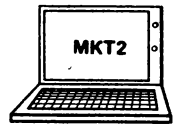
Ввод данных и формирование матрицы инциденций остаются без изменений.

Определение элементов матрицы сопротивлений контуров **A**, которая находится по формуле (2.2), можно осуществить более экономным способом по сравнению с программой МКТ1, если учесть, что **R** – это диагональная матрица:

$$A_{kl} = \sum_{i=1}^{N1} S_{ki} S_{li} R_i , \qquad (2.7)$$

где S_{ki} и S_{li} – элементы матрицы инциденций; R_i – сопротивление i-й ветви.

Эти вычисления оформим в виде сегмента с номерами строк 1100–1170 (см. с. 33), а нахождение вектора контурных ЭДС без матричных операторов выполним строками 1180–1220. Для решения уравнения (2.4) нужно обратить матрицу **A** с помощью ПП 5200 (1222–1280), после завершения этой процедуры обращенная матрица будет на месте исходной (более подробно см. в гл. 5). Теперь осталось получить вектор контурных токов (1292–1350), найти токи в ветвях (1352–1410) и вывести результаты (1670–1740). После объединения этих фрагментов с ПП 2000, ПП 3000 и ПП 5200 получаем программу МКТ2 для расчета электрических цепей методом контурных токов.




```
900  REM ************************************
902  REM * РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ *
904  REM * КОНТУРНЫХ ТОКОВ. ПОСТОЯННЫЙ ТОК . *
906  REM * ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОБМЕНА ДЛЯ      *
908  REM * ОБРАЩЕНИЯ МАТРИЦЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ   *
910  REM * КОНТУРОВ. НАЗВАНИЕ: "МКТ2".       *
912  REM ************************************
1000  DIM P[6,2],U[6],Z[6],S[3,6],A[3,4],C[3],X[3]
1001  REM------
1002  REM ВВОД СОПРОТИВЛЕНИЙ ВЕТВЕЙ
1003  REM И ТОПОЛОГИИ СХЕМЫ
1004  REM------
1010  GOSUB 2000
1011  REM------
1012  REM ВВОД ИСТОЧНИКОВ Э.Д.С. ВЕТВЕЙ
1013  REM------
1020  GOSUB 2500
1021  REM------
1022  REM ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ИНЦИДЕНЦИЙ
1023  REM------
1100  GOSUB 3000
1101  REM------
1102  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАТРИЦЫ
1103  REM СОПРОТИВЛЕНИЙ И ВЕКТОРА Э.Д.С.
1104  REM КОНТУРОВ
1105  REM------
1110  FOR I=1 TO N3
1120  FOR J=1 TO N3
1130  LET A[I,J]=0
1140  FOR K=1 TO N1
1150  LET A[I,J]=A[I,J]+S[I,K]*S[J,K]*P[K,2]
1160  NEXT K
1170  NEXT J
1180  LET C[I]=0
1190  FOR K=1 TO N1
1200  LET C[I]=C[I]+S[I,K]*U[K]
1210  NEXT K
1220  NEXT I
1221  REM------
1222  REM ОБРАЩЕНИЕ МАТРИЦЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ
1223  REM КОНТУРОВ
```

```
1224  REM------
1230  LET A1=N3
1240  LET A3=1.00000E-10
1250  GOSUB 5200
1260  IF A4>0 THEN 1300
1270  PRINT "МАТРИЦА ВЫРОЖДЕНА,"
1280  PRINT "ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРЕКРАЩАЮТСЯ."
1290  STOP
1291  REM------
1292  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ КОНТУРНЫХ ТОКОВ
1293  REM------
1300  FOR I=1 TO N3
1310  LET X[I]=0
1320  FOR J=1 TO N3
1330  LET X[I]=X[I]+A[I,J]*C[J]
1340  NEXT J
1350  NEXT I
1351  REM------
1352  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ ТОКОВ В ВЕТВЯХ
1353  REM------
1360  FOR K=1 TO N1
1370  LET Z[K]=0
1380  FOR I=1 TO N3
1390  LET Z[K]=Z[K]+S[I,K]*X[I]
1400  NEXT I
1410  NEXT K
1411  REM------
1412  REM ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ
1413  REM------
1500  GOSUB 1700
1600  STOP
1670  REM ************************************
1680  REM * ПП ПЕЧАТИ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ В ВЕТВЯХ *
1690  REM ************************************
1700  PRINT "ТОКИ В ВЕТВЯХ."
1710  PRINT "N ВЕТВИ","I"
1720  FOR K=1 TO N1
1730  PRINT K,Z[K]
1740  NEXT K
1750  RETURN
2460  REM ********************************
```

```
2470  REM * ВВОД ИСТОЧНИКОВ ПОСТОЯННОГО *
2480  REM * НАПРЯЖЕНИЯ ВЕТВЕЙ            *
2490  REM ********************************
2500  FOR K=1 TO N1
2510  LET U[K]=0
2520  NEXT K
2530  LET U[6]=10
2540  RETURN
9999  END

READY
```

Однако необходимо еще описать использованные массивы P, A, X, S, U, Z. Поскольку в программе отсутствуют матричные операторы, пользователь вправе отказаться от жестких ограничений на размерность массивов. Их можно, например, описать следующим образом:

1000 DIM P(K, 2), U(K), Z(K), S(L, K), A(L, L + 1), C(L), X(L)

причем K больше числа ветвей или равно ему, L равно числу независимых контуров.

Как уже отмечалось ранее, в этой строке вместо K и L надо подставить конкретные значения. После загрузки программы запустим ее на выполнение и проведем расчет для схемы, изображенной на рис. 2.1. Результаты расчета совпадают с приведенными на с. 24.

▼ Перейдем к расчету цепей на переменном токе с использованием метода контурных токов и снова приведем два варианта программы – с использованием матричных операторов (программа МКТ3) и без них (МКТ4). Методы и алгоритмы расчета аналогичны описанным ранее для постоянного тока. Отличие состоит в том, что все вычисления ведутся над комплексными числами, поэтому программы содержат дополнительные блоки, а длина их текста увеличивается. Усложняется также ввод исходных данных, так как каждая ветвь в общем случае может содержать активное сопротивление, индуктивность и емкость. Введенные параметры нужно пересчитать с учетом круговой частоты на комплексные сопротивления, для чего нужна специальная программа. Изменяется и ПП печати результатов.

Для подсчета комплексных сопротивлений необходимо выполнять действия с комплексными числами, для которых в большинстве известных версий языка БЕЙСИК не предусмотрены специальные функции, поэтому необходимо составлять ПП, реализующие сложение, умножение и деление таких величин. Кроме того, нужны ПП определения модуля комплексного числа и угла между действительной и мнимой его частями (аргумент комплексного числа). Эти ПП приведены в гл. 5.

Все матрицы при расчете на переменном токе (за исключением матрицы инциденций) должны быть комплексными – содержать действительные и мнимые части (т.е. действительные и мнимые матрицы). Соответственно в (2.1) и (2.6) матрицу **R** и векторы **U**, **X**, **Z** следует дополнить мнимыми членами и записать в виде $\mathbf{R} + j\mathbf{Q}$, $\mathbf{U} + j\mathbf{V}$, $\mathbf{X} + j\mathbf{Y}$, $\mathbf{Z} + j\mathbf{W}$.

Соотношения (2.2) и (2.3) приобретают вид

$$\mathbf{A} + j\mathbf{B} = \mathbf{S}(\mathbf{R} + j\mathbf{Q})\,\mathbf{S}^{\mathrm{T}}; \tag{2.8}$$

$$\mathbf{C} + j\mathbf{D} = \mathbf{S}(\mathbf{U} + j\mathbf{V}). \tag{2.9}$$

Комплексные токи в контурах

$$\mathbf{X} + j\mathbf{Y} = (\mathbf{A} + j\mathbf{B})^{-1}(\mathbf{C} + j\mathbf{D}), \tag{2.10}$$

а токи в ветвях находим по

$$\mathbf{Z} + j\mathbf{W} = \mathbf{S}^{\mathrm{T}}(\mathbf{X} + j\mathbf{Y}). \tag{2.11}$$

Так как в большинстве версий языка БЕЙСИК нет матричного оператора обращения комплексной матрицы, эту процедуру надо запрограммировать. Чтобы получить комплексную матрицу $\mathbf{E} + j\mathbf{F}$, обратную матрице $\mathbf{A} + j\mathbf{B}$, следует воспользоваться одной из двух пар формул:

1) при $\det(\mathbf{A}) \neq 0$

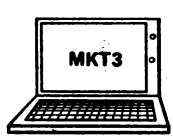
$$\mathbf{E} = (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1};\quad \mathbf{F} = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{E};$$

2) при $\det(\mathbf{B}) \neq 0$

$$\mathbf{F} = -(\mathbf{A}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{A} + \mathbf{B})^{-1};\quad \mathbf{E} = -\mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{F},$$

где $\det(\mathbf{A})$ и $\det(\mathbf{B})$ – определители матриц **A** и **B**.

С учетом сказанного и приведенных выше обозначений метод контурных токов для расчета электрической цепи, изображенной на рис. 2.1, на переменном токе может быть представлен программой МКТ3.




```
900  REM ******************************************
902  REM * РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ      *
904  REM * КОНТУРНЫХ ТОКОВ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК .      *
906  REM * МАТРИЧНЫЕ ОПЕРАТОРЫ БЭЙСИКА .         *
908  REM * НАЗВАНИЕ: "МКТ3" .                    *
910  REM ******************************************
1000  DIM P[6,4],R[6,6],Q[6,6],U[6],V[6]
1010  DIM Z[6],W[6],S[3,6],T[6,3],G[3,6]
1020  DIM A[3,3],B[3,3],E[3,3],F[3,3]
1030  DIM X[3],Y[3],H[3],C[3],D[3]
```

```
1031  REM------
1032  REM ВВОД ТАБЛИЦЫ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕТВЕЙ
1033  REM И ТОПОЛОГИИ СХЕМЫ
1034  REM------
1040  GOSUB 2000
1041  REM------
1042  REM ЗАДАНИЕ ЧАСТОТЫ
1043  REM------
1050  PRINT "F(ГЦ)=";
1060  INPUT F
1070  LET W=2*3.14159*F
1071  REM------
1072  REM ВВОД ИСТОЧНИКОВ СИНУСОИДАЛЬНОГО
1073  REM НАПРЯЖЕНИЯ ВЕТВЕЙ ( ЧАСТОТЫ F )
1074  REM------
1080  GOSUB 2500
1081  REM------
1082  REM ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ИНЦИДЕНЦИЙ
1083  REM------
1100  GOSUB 3000
1101  REM------
1102  REM ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ
1103  REM ВЕТВЕЙ
1104  REM------
1110  MAT R=ZER
1120  MAT Q=ZER
1130  FOR K=1 TO N1
1140  GOSUB 1800
1150  LET R[K,K]=R
1160  LET Q[K,K]=Q
1170  NEXT K
1171  REM------
1172  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ МАТРИЦЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ
1173  REM И ВЕКТОРА Э Д С  КОНТУРОВ
1174  REM------
1180  MAT T=TRN(S)
1190  MAT G=S*R
1200  MAT A=G*T
1210  MAT C=S*U
1220  MAT G=S*Q
1230  MAT B=G*T
```

```
1240  MAT D=S*V
1241  REM------
1242  REM ОБРАЩЕНИЕ МАТРИЦЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ
1243  REM КОНТУРОВ ( DET(A)#0 )
1244  REM------
1250  MAT E=INV(A)
1260  MAT F=E*B
1270  MAT E=B*F
1280  MAT B=A+E
1290  MAT E=INV(B)
1300  MAT B=F*E
1310  MAT F=(-1)*B
1311  REM------
1312  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ КОНТУРНЫХ ТОКОВ
1313  REM------
1320  MAT X=E*C
1330  MAT H=F*D
1340  MAT X=X-H
1350  MAT Y=E*D
1360  MAT H=F*C
1370  MAT Y=Y+H
1371  REM------
1372  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ ТОКОВ В ВЕТВЯХ
1373  REM------
1380  MAT Z=T*X
1390  MAT W=T*Y
1391  REM------
1392  REM ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ
1393  REM------
1500  GOSUB 1700
1510  STOP
1670  REM **********************************
1680  REM * ПЕЧАТЬ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ В ВЕТВЯХ *
1690  REM **********************************
1700  PRINT "ТОКИ В ВЕТВЯХ."
1710  PRINT "N ВЕТВИ","RE(I)","IM(I)"
1720  FOR K=1 TO N1
1730  PRINT K,Z[K],W[K]
1740  NEXT K
1750  RETURN
1790  REM ****************************************
```

```
1791  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ *
1792  REM * K-ТОЙ ВЕТВИ ( R+J*Q )                  *
1793  REM ******************************************
1800  LET R=P[K,2]
1810  LET Q=W*P[K,3]
1820  IF P[K,4]=0 THEN 1840
1830  LET Q=Q-1/W/P[K,4]
1840  RETURN
2460  REM *******************************
2470  REM * ВВОД ИСТОЧНИКОВ ПЕРЕМЕННОГО *
2480  REM * НАПРЯЖЕНИЯ ВЕТВЕЙ           *
2490  REM *******************************
2500  MAT U=ZER
2510  MAT V=ZER
2520  LET U[6]=10
2530  RETURN
9999  END
```

Комплексное сопротивление k-й ветви при заданной круговой частоте вычисляется в отдельной ПП 1800, вызываемой при заполнении диагональных элементов матрицы $\mathbf{R} + j\mathbf{Q}$ (строки 1110–1170).

Описание размерностей массивов требует особого внимания. В строках 1000–1030 указываются нужные величины:

```
1000 DIM P(K, 4), R(K, K), Q(K, K), U(K, K), V(K, K)
1010 DIM Z(K), W(K), S(L, K), T(K, L), G(L, K)
1020 DIM A(L, L), B(L, L), E(L, L), F(L, L)
1030 DIM X(L), Y(L), H(L), C(L), D(L)
```

где K – число ветвей, а L – число независимых контуров, которые следует заранее подсчитать.

При переходе к расчету иной схемы следует определить размерности массивов и заново ввести строки с описанием последних, а также строки 2500–2530, где организуется ввод вектора ЭДС.

В строках 1050–1070 вводится частота источников синусоидального напряжения ветвей (в герцах) и определяется круговая частота. Алгоритм программы составлен в предположении, что все эти источники имеют одинаковую частоту. (Для расчета электрической цепи, содержащей в отдельных своих ветвях источники с разными частотами, следует использовать принцип суперпозиции, проведя расчеты в отдельности для каждой частоты и затем просуммировав результаты.) Далее вызывается ПП 2500, которая формирует вектор источников ЭДС, ввод последних

производится в виде отдельных действительной и мнимой частей (векторы U и V).

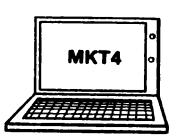
Рассчитаем схему, топологически эквивалентную показанной на рис. 2.1, но имеющую в каждой ветви *R, L, C*. Сначала в качестве тестовой задачи произведем с помощью программы МКТ3 расчет на постоянном токе, задав в качестве исходных данных нулевые индуктивности и емкости, а *R* – в соответствии с табл. 2.2. Частоту введем также равной 0, напряжение источника ЭДС в ветви 6 принимаем равным 10 В. Запустив программу МКТ3 на выполнение, выберем режим работы 3 (см. описание ПП 2000 в гл. 1) и введем данные. Можно убедиться, что полученные данные совпадают с приведенными на с. 24. Другие способы тестирования описаны в § 2.4.

▼ Перейдем к описанию программы МКТ4 – программы расчета электрических цепей на переменном токе по методу КТ без применения матричных операторов языка БЕЙСИК. Как и в случае перехода от МКТ1 к МКТ2, она получена путем последовательной замены всех матричных операторов МКТ3 соответствующими программными фрагментами. Однако в целях повышения эффективности программы решения системы линейных уравнений в отличие от МКТ3 определяется непосредственно методом Гаусса.

Ввод данных и топологии, формирование матрицы инциденций в автоматическом режиме остаются без изменений (применяются те же ПП 2000 и ПП 3000). Не изменяются также фрагменты ввода частоты и параметров источников ЭДС ветвей.

Для решения системы уравнений применяется ПП 5800 (которая описана в гл. 5), в соответствии с особенностями ее построения входные и выходные данные (коэффициенты матрицы, свободные члены и решение) располагаются в массивах A (действительные компоненты) и B (мнимые).

Применение метода Гаусса обосновано тем, что он позволяет отказаться от обращения матрицы системы уравнений и последующего умножений этой матрицы на столбец свободных членов. Это приводит к сокращению времени счета и повышению точности получаемых результатов.




```
900  REM ************************************
902  REM * РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ *
904  REM * КОНТУРНЫХ ТОКОВ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК.  *
906  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ КОНТУРНЫХ ТОКОВ        *
908  REM * МЕТОДОМ ГАУССА. НАЗВАНИЕ: 'МКТ4'. *
910  REM ************************************
1000  DIM P[6,4],U[6],V[6],Z[6],W[6],A[3,4],B[3,4],S[3,6]
1001  REM------
1002  REM ВВОД ТАБЛИЦЫ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕТВЕЙ
1003  REM И ТОПОЛОГИИ СХЕМЫ
```

```
1004  REM------
1010  GOSUB 2000
1011  REM------
1012  REM ЗАДАНИЕ ЧАСТОТЫ
1014  REM------
1020  PRINT "F(ГЦ)=";
1030  INPUT F
1040  LET W=2*3.14159*F
1041  REM------
1042  REM ВВОД ИСТОЧНИКОВ СИНУСОИДАЛЬНОГО
1043  REM НАПРЯЖЕНИЯ ВЕТВЕЙ
1044  REM------
1050  GOSUB 2500
1051  REM------
1052  REM ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ИНЦИДЕНЦИЙ
1053  REM------
1100  GOSUB 3000
1101  REM------
1102  REM ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ
1103  REM И ВЕКТОРА Э Д С  КОНТУРОВ
1104  REM------
1110  LET N4=N3+1
1120  FOR K=1 TO N1
1130  GOSUB 1800
1140  FOR I=1 TO N3
1150  FOR J=1 TO N3
1160  IF K>1 THEN 1190
1170  LET A[I,J]=0
1180  LET B[I,J]=0
1190  LET S=S[I,K]*S[J,K]
1200  LET A[I, ]=A[I,J]+S*R
1210  LET B[I,J]=B[I,J]+S*Q
1220  NEXT J
1230  IF K>1 THEN 1260
1240  LET A[I,N4]=0
1250  LET B[I,N4]=0
1260  LET A[I,N4]=A[I,N4]+S[I,K]*U[K]
1270  LET B[I,N4]=B[I,N4]+S[I,K]*V[K]
1280  NEXT I
1290  NEXT K
1291  REM------
```

```
1292  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ КОНТУРНЫХ ТОКОВ
1293  REM------
1300  LET A1=N3
1310  LET A2=1
1320  LET A3=1.00000E-10
1330  GOSUB 5800
1340  IF A4>0 THEN 1380
1350  PRINT "МАТРИЦА СИСТЕМЫ ВЫРОЖДЕНА,"
1360  PRINT "ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРЕКРАЩАЮТСЯ."
1370  STOP
1371  REM------
1372  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ ТОКОВ В ВЕТВЯХ
1373  REM------
1380  FOR K=1 TO N1
1390  LET Z[K]=0
1400  LET W[K]=0
1410  FOR I=1 TO N3
1420  LET Z[K]=Z[K]+S[I,K]*A[I,N4]
1430  LET W[K]=W[K]+S[I,K]*B[I,N4]
1440  NEXT I
1450  NEXT K
1451  REM------
1452  REM ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ
1453  REM------
1500  GOSUB 1700
1510  STOP
1670  REM ************************************
1680  REM * ПП ПЕЧАТИ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ В ВЕТВЯХ *
1690  REM ************************************
1700  PRINT "ТОКИ В ВЕТВЯХ."
1710  PRINT "N ВЕТВИ","RE(I)","IM(I)"
1720  FOR K=1 TO N1
1730  PRINT K,Z[K],W[K]
1740  NEXT K
1750  RETURN
1790  REM ****************************************
1791  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ *
1792  REM * K-Й  ВЕТВИ ( R+J*Q )                  *
1793  REM ****************************************
1800  LET R=P[K,2]
1810  LET Q=W*P[K,3]
```

```
1820  IF P[K,4]=0 THEN 1840
1830  LET Q=Q-1/W/P[K,4]
1840  RETURN
2460  REM ********************************
2470  REM * ВВОД ИСТОЧНИКОВ ПЕРЕМЕННОГО  *
2480  REM * НАПРЯЖЕНИЯ ВЕТВЕЙ            *
2490  REM ********************************
2500  FOR K=1 TO N1
2510  LET U[K]=0
2520  LET V[K]=0
2530  NEXT K
2540  LET U[6]=10
2550  RETURN
9999  END
```

Остановимся на описании массивов. В строке

1000 DIM P(K, 4), U(K), V(K), Z(K), W(K), A(L, L + 1), B(L, L + 1), S(L, K)

по прежнему K — число ветвей схемы, L — число независимых контуров схемы.

В МКТ4 (как и в МКТ2) в отличие от программ с матричными операторами допускается резервирование массивов несколько большей размерности, чем это необходимо для проведения конкретного расчета. Это позволяет расширить область применения этих программ, так как теперь нет необходимости для каждой конкретной анализируемой цепи переделывать описание размерностей массивов.

Протестировать программу МКТ4 рекомендуется аналогично программе МКТ3.

2.3. Метод узловых потенциалов

▼ Метод узловых потенциалов широко применяется при расчетах электрических цепей. Так, например, в [30], где приведен сопоставительный анализ нескольких отечественных пакетов прикладных программ, отмечается, что в них используется только метод УП. Одной из причин, способствовавших распространенности этого метода, является то, что матрица инциденций в этом случае имеет очень простой вид. Она задает связь узлов и ветвей цепи и тем самым непосредственно описывает ее топологию. Если в ЭВМ введен в определенном порядке список ветвей и смежных узлов, то по нему легко подготовить матрицу системы линейных уравнений, не составляя матрицу инциденций, и достичь при этом определенной экономии оперативной памяти. Так же легко формируется и столбец свободных членов.

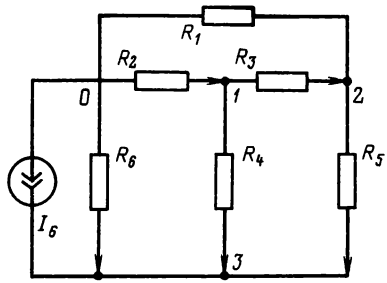


Рис. 2.2. Тестовая схема для расчета по методу узловых потенциалов

Как известно, метод УП основан на первом законе Кирхгофа. В предположении, что имеющиеся в цепи источники ЭДС заменены источниками тока, применение метода сводится к составлению и последующему решению уравнения

$$(\mathbf{SRS}^{\mathrm{T}})\mathbf{X} = \mathbf{SU}, \qquad (2.15)$$

где **S** – матрица инциденций; **R** – диагональная матрица проводимостей ветвей; $\mathbf{S}^{\mathrm{T}}$ – транспонированная матрица **S**; **X** – вектор напряжений в узлах; **U** – вектор источников токов в ветвях.

Решение (2.15) имеет вид

$$\mathbf{X} = (\mathbf{SRS}^{\mathrm{T}})^{-1}\mathbf{SU} \qquad (2.16)$$

и может быть закодировано в виде последовательности матричных операторов БЕЙСИКа (подобно строкам 1150–1210 в программе МКТ0).

Кроме этой последовательности в программу расчета должны быть включены блоки ввода и вывода и описание массивов.

▼ Опишем порядок составления программы, которую назовем МУП0, для расчета схемы, изображенной на рис. 2.2. Она топологически эквивалентна схеме, приведенной на рис. 2.1. Различие между ними состоит в том, что в последней источник ЭДС заменен на эквивалентный источник тока, внутреннее сопротивление которого равно внутреннему сопротивлению источника ЭДС. Методика такого преобразования описана в ряде руководств по ТОЭ, см., например, [29]. Такой выбор примера позволяет проверять и сопоставлять результаты расчетов, получаемые разными программами (МКТ и МУП). Как и в МКТ0, описание массивов дается строками

```
1000 DIM P(K, K), U(K)
1010 DIM S(L, K), T(K, L), G(L, K)
1020 DIM A(L, L), E(L, L), X(L)
```

где K – число ветвей; L = M – 1 при числе узлов схемы, равном M. Для рассматриваемой схемы следует ввести с клавиатуры эти строки, подставив в них K = 6 и L = 3.

Особенность в подготовке к вычислениям по методу УП состоит в выделении базисного узла (называемого также нулевым узлом), в котором потенциал условно принимается равным 0. Получаемые по данному методу значения потенциалов определены относительно потенциала базисного узла. Истинные значения всех потенциалов можно получить простым пересчетом в том случае, когда известен потенциал одного из узлов.

При нумерации базисному узлу целесообразно присвоить нулевой номер, так как это существенно упростит в дальнейшем подготовку системы линейных уравнений.

После выбора направлений токов приступим к построению матрицы инциденций, которая дает связь между узлами схемы (базисный узел в нее не включается) и условно выбранными направлениями токов в ветвях и составляется по следующему правилу:

S_{ij} = 0, если ветвь не примыкает к узлу;

S_{ij} = 1, если ветвь примыкает к узлу, причем ток направлен в сторону узла;

S_{ij} = -1, если ветвь примыкает к узлу, причем ток направлен от узла.

Пользуясь этим правилом, составим матрицу инциденций, приведенную в табл. 2.3.

Таблица 2.3

№ узла	№ ветви					
	1	2	3	4	5	6
1	0	1	−1	−1	0	0
2	1	0	1	0	−1	0
3	0	0	0	1	1	1

На этом подготовительная часть работы закончена, можно набирать текст программы.

```
900  REM ****************************************
902  REM * РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ     *
904  REM * УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ. ПОСТОЯННЫЙ ТОК . *
906  REM * МАТРИЧНЫЕ ОПЕРАТОРЫ БЕЙСИКА.          *
908  REM * НАЗВАНИЕ: "МУПО" .                    *
910  REM ****************************************
1000  DIM R[6,6],U[6],S[3,6]
1010  DIM T[6,3],G[3,6],A[3,3]
1020  DIM E[3,3],C[3],X[3]
```

```
1030  DATA 6,2,1,5,4,3
1040  MAT  READ U
1050  MAT R=ZER
1060  FOR I=1 TO 6
1070  LET R[I,I]=1/U[I]
1080  NEXT I
1090  MAT U=ZER
1100  LET U[6]=10/3
1110  DATA 0,1,-1,-1,0,0
1120  DATA 1,0, 1,0,-1,0
1130  DATA 0,0,0,1,1,1
1140  MAT  READ S
1150  MAT T=TRN(S)
1160  MAT G=S*R
1170  MAT A=G*T
1180  MAT C=S*U
1190  MAT E=INV(A)
1200  MAT X=E*C
1210  PRINT "ПОТЕНЦИАЛЫ УЗЛОВ."
1220  PRINT "(ПОТЕНЦИАЛ БАЗИСНОГО УЗЛА"
1230  PRINT "ПРИНИМАЕТСЯ РАВНЫМ НУЛЮ)."
1240  MAT  PRINT X
1250  END
```

Учитывая, что все данные вводятся оператором READ, остается только запустить МУП0 на выполнение. Получаются следующие результаты:

```
ПОТЕНЦИАЛЫ УЗЛОВ
(ПОТЕНЦИАЛ БАЗИСНОГО УЗЛА
ПРИНИМАЕТСЯ РАВНЫМ НУЛЮ)
 2.1157
 2.47934
 5.58678
```

Зная величины потенциалов, можно получить токи в ветвях и сравнить их с приведенными на с. 24.

▼ Хотя процесс подготовки матрицы инциденций для МУП не представляет особых трудностей, тем не менее для автоматизации этой процедуры была разработана программа ПП 3000.

```
2900  REM ***************************************
2902  REM * ПП ФОРМИРОВАНИЯ МАТРИЦЫ ИНЦИДЕНЦИЙ  *
2904  REM * ДЛЯ РАСЧЕТА ПО МЕТОДУ УЗЛОВЫХ       *
2906  REM * ПОТЕНЦИАЛОВ.                        *
2908  REM ***************************************
3000  DEF FNA(A)=INT(A)
3002  DEF FNB(B)=INT((B-FNA(B))*N0+.5)
3100  LET N3=N2
3102  FOR K=1 TO N3
3104  FOR K1=1 TO N1
3106  LET S[K,K1]=0
3108  NEXT K1
3110  NEXT K
3112  FOR K=1 TO N1
3114  LET K1=FNA(P[K,1])
3116  IF K1=0 THEN 3120
3118  LET S[K1,K]=-1
3120  LET K1=FNB(P[K,1])
3122  IF K1=0 THEN 3126
3124  LET S[K1,K]=1
3126  NEXT K
3128  RETURN
```

Следует обратить особое внимание на тот факт, что матрицы инциденций для методов КТ и УП различны, соответственно различны и алгоритмы ПП 3000 для МКТ и для МУП.

Входными данными для ПП 3000 служит массив параметров ветвей P, который вместе с переменными N0, N1, N2 определяется в ПП 2000.

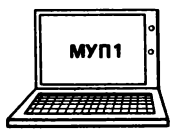
По окончании работы ПП 3000 в массиве S размерностью N3 x N1 (N3 вычисляется в ПП 3000) располагается матрица инциденций.

▼ Будем последовательно усложнять решаемые задачи и описывать соответствующие программы. Сначала сконструируем программу МУП1. Ее назначение – расчет электрических цепей на постоянном токе методом узловых потенциалов с применением матричных операторов БЕЙСИКа. Для нее фрагмент МУП0 ввода исходных данных заменим обращением к подпрограммам ПП 2000, ПП 2500 и ПП 3000. Назначение первой и третьей известны, а ПП 2500 обеспечивает ввод источников тока ветвей, и каждый пользователь должен составлять ее сам для своей конкретной схемы. Для тестовой схемы, приведенной на рис. 2.2, она выглядит так:

```
2500 MAT U = ZER
2510 LET U(6) = 10/P(6,2)
2520 RETURN
```

Строка 2510 позволяет здесь задать источник тока, эквивалентный источнику ЭДС схемы, изображенной на рис. 2.1, с напряжением 10 В и внутренним сопротивлением 3 Ом, что обеспечивает сопоставимость результатов расчета.

Приведем полный текст программы МУП1.




```
900  REM ******************************************
902  REM * РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ      *
904  REM * УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ. ПОСТОЯННЫЙ ТОК .  *
906  REM * МАТРИЧНЫЕ ОПЕРАТОРЫ БЭЙСИКА .          *
908  REM * НАЗВАНИЕ: "МУП1" .                     *
910  REM ******************************************
1000  DIM P[6,2],R[6,6],U[6]
1010  DIM S[3,6],T[6,3],G[3,6]
1020  DIM A[3,3],E[3,3],C[3],X[3]
1021  REM------
1022  REM ВВОД СОПРОТИВЛЕНИЙ ВЕТВЕЙ
1023  REM И ТОПОЛОГИИ СХЕМЫ
1024  REM------
1030  GOSUB 2000
1031  REM------
1032  REM ВВОД ИСТОЧНИКОВ ТОКА ВЕТВЕЙ
1033  REM------
1040  GOSUB 2500
1041  REM------
1042  REM ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ИНЦИДЕНЦИЙ
1043  REM------
1100  GOSUB 3000
1101  REM------
1102  REM ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ПРОВОДИМОСТЕЙ
1103  REM ВЕТВЕЙ
1104  REM------
1110  MAT R=ZER
1120  FOR K=1 TO N1
1130  LET R[K,K]=1/P[K,2]
1140  NEXT K
1141  REM------
1142  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ МАТРИЦЫ ПРОВОДИМОСТЕЙ
```

```
1143  REM УЗЛОВ
1144  REM------
1150  MAT T=TRN(S)
1160  MAT G=S*R
1170  MAT A=G*T
1171  REM------
1172  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЕКТОРА
1173  REM УЗЛОВЫХ ТОКОВ
1174  REM------
1180  MAT C=S*U
1181  REM------
1182  REM ОБРАЩЕНИЕ МАТРИЦЫ
1183  REM УЗЛОВЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ
1184  REM------
1190  MAT E=INV(A)
1191  REM------
1192  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ УЗЛОВЫХ
1193  REM ПОТЕНЦИАЛОВ
1194  REM------
1200  MAT X=E*C
1201  REM------
1202  REM ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ
1203  REM------
1500  GOSUB 1700
1510  RETURN
1670  REM *********************************
1680  REM * ПП ПЕЧАТИ НАПРЯЖЕНИЙ В УЗЛАХ *
1690  REM *********************************
1700  PRINT "ПОТЕНЦИАЛЫ УЗЛОВ."
1710  PRINT "ПОТЕНЦИАЛ БАЗИСНОГО (НУЛЕВОГО)"
1720  PRINT "УЗЛА ПРИНИМАЕТСЯ РАВНЫМ НУЛЮ."
1730  MAT  PRINT X
1740  RETURN
2470  REM *********************************
2480  REM * ВВОД ИСТОЧНИКОВ ТОКА ВЕТВЕЙ *
2490  REM *********************************
2500  MAT U=ZER
2510  LET U[6]=10/P[6,2]
2520  RETURN
9999  END
```

Массивы в ней в общем случае описываются строками

```
1000 DIM P(K, 2), R(K, K), U(K)
1010 DIM S(L, K), T(K, L), G(L, K)
1020 DIM A(L, L), E(L, L), C(L), X(L)
```

где K – число ветвей схемы; L = M – 1 при числе узлов, равном M. Для тестовой схемы следует подставить в строки 1000–1020 значения K = 6 и L = 3.

Проведя вычисления, убедимся в ее работоспособности, а затем сопоставим полученные данные с результатами расчета по программе МКТ1 для тестовой схемы (рис. 2.2).

Укажем, что в данной и последующих программах следует обращать особое внимание на знак (полярность) источников токов. Он принимается положительным, если его действие совпадает с условно выбранным направлением тока в данной ветви.

▼ Переработаем программу МУП1, приспособив ее для версий БЕЙСИКа, не содержащих матричных операторов. Это можно было бы сделать по аналогии с описанной МКТ2, однако в силу простоты матрицы инциденций, как отмечалось выше, возможно систему линейных уравнений (для которой нужны матрицы удельных проводимостей и вектор узловых токов) сформировать непосредственно, минуя этап составления матрицы инциденций. Благодаря этому достигается существенная экономия объема используемой памяти и сокращается время счета. В этом сказываются преимущества метода УП по сравнению с методом КТ.

Дальнейшей экономии машинных ресурсов и увеличения быстродействия по сравнению с МКТ2 можно достичь, если решать систему линейных уравнений методом Гаусса.

Законченный текст программы МУП2 со всеми внесенными усовершенствованиями приведен ниже.

```
900  REM ****************************************
902  REM * РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ    *
904  REM * УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ. ПОСТОЯННЫЙ ТОК .*
906  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ       *
908  REM * МЕТОДОМ ГАУССА. НАЗВАНИЕ: "МУП2" .   *
910  REM ****************************************
1000  DIM P[6,2],U[6],A[3,4]
1010  DEF FNA(A)=INT(P[A,1])
1020  DEF FNB(B)=INT((P[B,1]-FNA(B))*NO+.5)
1021  REM------
1022  REM ВВОД СОПРОТИВЛЕНИЙ ВЕТВЕЙ
1023  REM И ТОПОЛОГИИ СХЕМЫ
1024  REM------
```

```
1030  GOSUB 2000
1031  REM------
1032  REM ВВОД ИСТОЧНИКОВ ТОКА ВЕТВЕЙ
1033  REM------
1040  GOSUB 2500
1041  REM------
1042  REM ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ УЗЛОВЫХ
1043  REM ПРОВОДИМОСТЕЙ И ВЕКТОРА УЗЛОВЫХ
1044  REM ТОКОВ
1045  REM------
1100  LET N3=N2+1
1110  FOR I=1 TO N2
1120  FOR J=1 TO N3
1130  LET A[I,J]=0
1140  NEXT J
1150  NEXT I
1160  FOR K=1 TO N1
1170  LET G=1/P[K,2]
1180  LET I=FNA(K)
1190  IF I=0 THEN 1220
1200  LET A[I,I]=A[I,I]+G
1210  LET A[I,N3]=A[I,N3]-U[K]
1220  LET J=FNB(K)
1230  IF J=0 THEN 1290
1240  LET A[J,J]=A[J,J]+G
1250  LET A[J,N3]=A[J,N3]+U[K]
1260  IF I*J=0 THEN 1290
1270  LET A[I,J]=A[I,J]-G
1280  LET A[J,I]=A[I,J]
1290  NEXT K
1291  REM------
1292  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ
1293  REM------
1300  LET A1=N2
1310  LET A2=1
1320  LET A3=1.00000E-10
1330  GOSUB 5600
1340  IF A4>0 THEN 1500
1350  PRINT "МАТРИЦА СИСТЕМЫ ВЫРОЖДЕНА,"
1360  PRINT "ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРЕКРАЩАЮТСЯ."
1370  STOP
```

```
1371  REM------
1372  REM ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ
1373  REM------
1500  GOSUB 1700
1510  STOP
1670  REM *******************************
1680  REM *  ПЕЧАТЬ НАПРЯЖЕНИЙ В УЗЛАХ  *
1690  REM *******************************
1700  PRINT "ПОТЕНЦИАЛЫ УЗЛОВ."
1710  PRINT "ПОТЕНЦИАЛ ВАЗИСНОГО (НУЛЕВОГО)"
1720  PRINT "УЗЛА ПРИНИМАЕТСЯ РАВНЫМ НУЛЮ."
1730  PRINT "N УЗЛА","U"
1740  FOR K=1 TO N2
1750  PRINT K,A[K,N3]
1760  NEXT K
1770  RETURN
2470  REM *******************************
2480  REM * ВВОД ИСТОЧНИКОВ ТОКА ВЕТВЕЙ *
2490  REM *******************************
2500  FOR K=1 TO N1
2510  LET U[K]=0
2520  NEXT K
2530  LET U[6]= 10/ P[6,2]
2540  RETURN
9999  END
```

Из текста программы наглядно видна достигнутая экономия объема памяти, необходимой для хранения массивов. Они описываются одной строкой:

1000 DIM P(K, 2), U(K), A(L, L + 1)

где K — число ветвей схемы, и при числе узлов, равном M, L = M — 1.

Протестировать программу можно описанным выше способом.

Перейдем к расчету цепей на переменном токе. Программа МУПЗ, предназначенная для расчета таких цепей с использованием матричных операторов, может быть построена аналогично МКТЗ. Алгоритмы расчета в этих двух программах практически полностью совпадают. Отличие состоит в том, что при формировании матрицы проводимостей ветвей в элементах большой диагонали следует размещать не комплексные сопротивления ветвей, подсчитанные при заданной круговой частоте, а их проводимости. В связи с этим помимо ПП 1800, предназначенной для вычисления комплексных сопротивлений ветвей, введена также

ПП 1850, которая, вызывая 1800, находит их проводимости. В данной программе используется матрица инциденций, поэтому для ее составления привлекается ПП 3000 (в варианте, разработанном для метода узловых потенциалов).

С полным текстом программы можно познакомиться по ее листингу, приведенному ниже.

```
900  REM ****************************************
902  REM * РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ     *
904  REM * УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК . *
906  REM * МАТРИЧНЫЕ ОПЕРАТОРЫ БЭЙСИКА .         *
908  REM * НАЗВАНИЕ: "МУП3" .                    *
910  REM ****************************************
1000  DIM P[6,4],R[6,6],Q[6,6],U[6],V[6]
1010  DIM S[3,6],T[6,3],G[3,6],A[3,3],B[3,3]
1020  DIM E[3,3],F[3,3],C[3],D[3],H[3],X[3],Y[3]
1021  REM------
1022  REM ВВОД ТАБЛИЦЫ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕТВЕЙ
1023  REM И ТОПОЛОГИИ СХЕМЫ
1024  REM------
1030  GOSUB 2000
1031  REM------
1032  REM ЗАДАНИЕ ЧАСТОТЫ
1033  REM------
1040  PRINT "F(ГЦ)=";
1050  INPUT F
1060  LET W=2*3.14159*F
1061  REM------
1062  REM ВВОД ИСТОЧНИКОВ СИНУСОИДАЛЬНОГО
1063  REM ТОКА ВЕТВЕЙ ( ЧАСТОТЫ F )
1064  REM------
1070  GOSUB 2500
1071  REM------
1072  REM ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ИНЦИДЕНЦИЙ
1073  REM------
1100  GOSUB 3000
1101  REM------
1102  REM ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ
1103  REM ПРОВОДИМОСТЕЙ ВЕТВЕЙ
1104  REM------
1110  MAT R=ZER
1120  MAT Q=ZER
```

```
1130  FOR K=1 TO N1
1140  GOSUB 1850
1150  LET R[K,K]=R
1160  LET Q[K,K]=Q
1170  NEXT K
1171  REM------
1172  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ МАТРИЦЫ
1173  REM УЗЛОВЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ
1174  REM И ВЕКТОРА УЗЛОВЫХ ТОКОВ
1175  REM------
1180  MAT T=TRN(S)
1190  MAT G=S*R
1200  MAT A=G*T
1210  MAT C=S*U
1220  MAT G=S*Q
1230  MAT B=G*T
1240  MAT D=S*V
1241  REM------
1242  REM ОБРАЩЕНИЕ МАТРИЦЫ УЗЛОВЫХ
1243  REM ПРОВОДИМОСТЕЙ ( DET(A)#0 )
1244  REM------
1250  MAT E=INV(A)
1260  MAT F=E*B
1270  MAT E=B*F
1280  MAT B=A+E
1290  MAT E=INV(B)
1300  MAT B=F*E
1310  MAT F=(-1)*B
1311  REM------
1312  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ УЗЛОВ
1313  REM------
1320  MAT X=E*C
1330  MAT H=F*D
1340  MAT X=X-H
1350  MAT Y=E*D
1360  MAT H=F*C
1370  MAT Y=Y+H
1371  REM------
1372  REM ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ
1373  REM------
1500  GOSUB 1700
```

```
1510  STOP
1670  REM ****************************
1680  REM * ПЕЧАТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ УЗЛОВ *
1690  REM ****************************
1700  PRINT "ПОТЕНЦИАЛЫ УЗЛОВ."
1710  PRINT "ПОТЕНЦИАЛ ВАЗИСНОГО (НУЛЕВОГО)"
1720  PRINT "УЗЛА ПРИНИМАЕТСЯ РАВНЫМ НУЛЮ."
1730  PRINT "N УЗЛА","RE(U)","IM(U)"
1740  FOR K=1 TO N№
1750  PRINT K,X[K],Y[K]
1760  NEXT K
1770  RETURN
1790  REM ****************************************
1791  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ *
1792  REM * K-Й   ВЕТВИ ( R+J*Q )                 *
1793  REM ****************************************
1800  LET R=P[K,2]
1810  LET Q=W*P[K,2]
1820  IF P[K,4]=0 THEN 1840
1830  LET Q=Q-1/W/P[K,4]
1840  RETURN
1841  REM ***************************************
1842  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ПРОВОДИМОСТИ *
1843  REM * K-Й   ВЕТВИ ( R+J*Q )                *
1844  REM ***************************************
1850  GOSUB 1800
1860  LET Z=R*R+Q*Q
1870  LET R=R/Z
1880  LET Q=-Q/Z
1890  RETURN
2460  REM ***********************************
2470  REM * ВВОД ИСТОЧНИКОВ СИНУСОИДАЛЬНОГО *
2480  REM * ТОКА ВЕТВЕЙ ( ЧАСТОТЫ F )       *
2490  REM ***********************************
2500  MAT U=ZER
2510  MAT V=ZER
2520  LET K=6
2530  GOSUB 1850
2540  LET U[6]=10*R
2550  LET V[6]=10*Q
2560  RETURN
9999  END
```

В ней в строках 1000–1020 дано описание массивов, используемых при решении тестовой задачи. Для общего случая, когда требуется иная размерность массивов, они должны быть описаны следующим способом:

```
1000 DIM P(K, 4), R(K, K), Q(K, K), U(K), V(K)
1010 DIM S(L, K), T(K, L), G(L, K), A(L, L), B(L, L)
1020 DIM E(L, L), F(L, L), C(L), D(L), H(L), X(L), Y(L)
```

где K и L – те же, что и для МУП1.

Для тестирования программы используем схему, изображенную на рис. 2.2, параметры ветвей которой приведены в табл. 2.4, а частоту примем равной 0,159155 Гц. Источник переменного тока ветвей вводится в ПП 2500 (см. строки 2500–2580).

Таблица 2.4

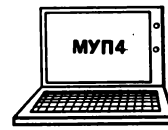
N ветвей	Nузлов		R, Ом	L, Гн	C, Ф	I, A
1	0	2	6	6	0	0
2	0	1	2	2	0	0
3	1	2	1	1	0	0
4	1	3	5	6	0	0
5	2	3	4	4	0	0
6	0	3	3	3	0	10

Запустив программу на выполнение и указав в соответствии с запросами ПП 2000 все исходные данные, получим

```
ПОТЕНЦИАЛЫ УЗЛОВ.
ПОТЕНЦИАЛ БАЗИСНОГО (НУЛЕВОГО)
УЗЛА ПРИНИМАЕТСЯ РАВНЫМ НУЛЮ.
N УЗЛА      RE(U)          IM(U)
  1         2.1157        -2.38419E-07
  2         2.47934       -2.38419E-07
  3         5.558677      -4.76837E-07
```

Протестировать программу МУП3 можно аналогично тому, как это сделано для МКТ3 в § 2.2 (см. также § 2.4).

Опишем программу МУП4. Ее назначение – расчет цепи на переменном токе без матричных операторов. Алгоритм подготовки и решения систем линейных уравнений в ней совпадает с использованным в МУП2, в частности здесь не применяется матрица инциденций, что позволяет повысить эффективность программы. Полный ее текст приведен ниже.




```
900  REM ****************************************
902  REM * РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ    *
904  REM * УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. *
906  REM * ВЫЧИСЛЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛОВ МЕТОДОМ       *
908  REM * ГАУССА. НАЗВАНИЕ: "МУП4" .           *
910  REM ****************************************
1000  DIM P[6,4],A[3,4],B[3,4],U[6],V[6]
1010  DEF FNA(A)=INT(P[A,1])
1020  DEF FNB(B)=INT((P[B,1]-FNA(B))*NO+.5)
1021  REM------
1022  REM ВВОД СОПРОТИВЛЕНИЙ ВЕТВЕЙ
1023  REM И ТОПОЛОГИИ СХЕМЫ
1024  REM------
1030  GOSUB 2000
1031  REM------
1032  REM ЗАДАНИЕ ЧАСТОТЫ
1033  REM------
1040  PRINT "F(ГЦ)=";
1050  INPUT F
1060  LET W=2*3.14159*F
1061  REM------
1062  REM ВВОД ИСТОЧНИКОВ СИНУСОИДАЛЬНОГО
1063  REM ТОКА ВЕТВЕЙ ( ЧАСТОТЫ F )
1064  REM------
1070  GOSUB 2500
1071  REM------
1072  REM ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ УЗЛОВЫХ
1073  REM ПРОВОДИМОСТЕЙ И ВЕКТОРА
1074  REM УЗЛОВЫХ ТОКОВ
1075  REM------
1100  LET N3=N2+1
1110  FOR I=1 TO N2
1120  FOR J=1 TO N3
1130  LET A[I,J]=0
1140  LET B[I,J]=0
1150  NEXT J
1160  NEXT I
1170  FOR K=1 TO N1
1180  GOSUB 1850
1190  LET I=FNA(K)
1200  IF I=0 THEN 1250
1210  LET A[I,I]=A[I,I]+R
```

```
1220  LET B[I,I]=B[I,I]+Q
1230  LET A[I,N3]=A[I,N3]-U[K]
1240  LET B[I,N3]=B[I,N3]-V[K]
1250  LET J=FNB(K)
1260  IF J=0 THEN 1360
1270  LET A[J,J]=A[J,J]+R
1280  LET B[J,J]=B[J,J]+Q
1290  LET A[J,N3]=A[J,N3]+U[K]
1300  LET B[J,N3]=B[J,N3]+V[K]
1310  IF I*J=0 THEN 1360
1320  LET A[I,J]=A[I,J]-R
1330  LET B[I,J]=B[I,J]-Q
1340  LET A[J,I]=A[I,J]
1350  LET B[J,I]=B[I,J]
1360  NEXT K
1361  REM------
1362  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ
1363  REM------
1370  LET A1=N2
1380  LET A2=1
1390  LET A3=1.00000E-10
1400  GOSUB 5800
1410  IF A4>0 THEN 1500
1420  PRINT "МАТРИЦА СИСТЕМЫ ВЫРОЖДЕНА,"
1430  PRINT "ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРЕКРАЩАЮТСЯ."
1440  STOP
1441  REM------
1442  REM ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ
1443  REM------
1500  GOSUB 1700
1510  STOP
1670  REM ****************************
1680  REM * ПЕЧАТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ УЗЛОВ *
1690  REM ****************************
1700  PRINT "ПОТЕНЦИАЛЫ УЗЛОВ."
1710  PRINT "ПОТЕНЦИАЛ БАЗИСНОГО (НУЛЕВОГО)"
1720  PRINT "УЗЛА ПРИНИМАЕТСЯ РАВНЫМ НУЛЮ."
1730  PRINT "N УЗЛА","RE(U)","IM(U)"
1740  FOR K=1 TO N2
1750  PRINT K,A[K,N3],B[K,N3]
1760  NEXT K
```

```
1770  RETURN
1790  REM ****************************************
1791  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ *
1792  REM * K-Й   ВЕТВИ ( R+J*Q )                 *
1793  REM ****************************************
1800  LET R=P[K,2]
1810  LET Q=W*P[K,3]
1820  IF P[K,4]=0 THEN 1840
1830  LET Q=Q-1/W/P[K,4]
1840  RETURN
1841  REM ***************************************
1842  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ПРОВОДИМОСТИ *
1843  REM * K-Й   ВЕТВИ ( R+J*Q )                *
1844  REM ***************************************
1850  GOSUB 1800
1860  LET Z=R*R+Q*Q
1870  LET R=R/Z
1880  LET Q=-Q/Z
1890  RETURN
2460  REM ***********************************
2470  REM * ВВОД ИСТОЧНИКОВ СИНУСОИДАЛЬНОГО *
2480  REM * ТОКА ВЕТВЕЙ                      *
2490  REM ***********************************
2500  FOR K=1 TO N1
2510  LET U[K]=0
2520  LET V[K]=0
2530  NEXT K
2540  LET K=6
2550  GOSUB 1850
2560  LET U[6]=10*R
2570  LET V[6]=10*Q
2580  RETURN
9999  END
```

Можно заметить, что в программе значительно сокращен объем памяти, выделяемой под массивы, которые описываются следующим образом:

1000 DIM P(K, 4), A(L, L + 1), B(L, L + 1), U(K), V(K)

где K и L имеют тот же смысл, что и для программы МУП3.

2.4. Освоение и тестирование программ

Программы из § 2.2 и 2.3 используют ПП, сводный список которых приведен в табл. 2.5 и 2.6. Часть из них может использоваться во всех расчетах без каких-либо изменений, так как текст их оптимизирован в пределах, задаваемых возможностями выбранного подмножества языка БЕЙСИК. Однако некоторые из них должны быть представлены в иной форме, более удобной и привычной для пользователя. В меньшей степени это относится к ПП 2000, которая допускает некоторую модификацию, главным образом, за счет сокращения или расширения текста диалога,

Таблица 2.5

№ ПП	Назначение ПП	МКТ1	МКТ2	МКТ3	МКТ4
1700	Выходная печать	+	+	+	+
1800	Вычисление комплексного сопротивления ветвей			+	+
2000	Ввод топологии и параметров схемы	+	+	+	+
2500	Ввод источников ЭДС ветвей	+	+	+	+
3000	Формирование матрицы инциденций	+	+	+	+
5200	Обращение матрицы методом обмена		+		
5800	Решение системы линейных уравнений методом Гаусса				+

Таблица 2.6

№ ПП	Назначение ПП	МУП1	МУП2	МУП3	МУП4
1700	Выходная печать	+	+	+	+
1800	Вычисление комплексного сопротивления ветвей			+	+
1850	Вычисление комплексной проводимости ветвей			+	+
2000	Ввод топологии и параметров ветвей	+	+	+	+
2500	Ввод источников тока ветвей	+	+	+	+
3000	Формирование матрицы инциденций	+		+	
5600	Решение системы линейных уравнений с действительными коэффициентами методом Гаусса		+		
5800	Решение системы линейных уравнений с комплексными коэффициентами методом Гаусса				+

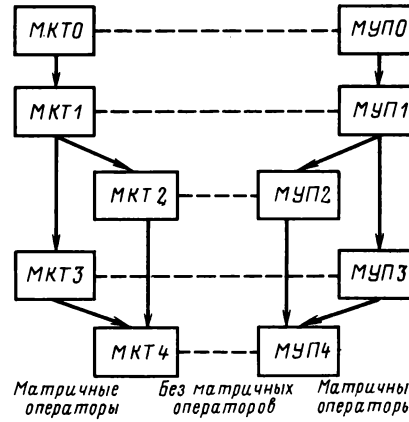


Рис. 2.3. Граф связей между программами МКТ и МУП. Штриховые линии обозначают сходство решаемых задач

подсказок, более компактного представления данных (при вводе и отображении на дисплей), особенно в случае, если диалог осуществляется через печатающее устройство или результаты счета выводятся на печать.

В целом программы в § 2.2 и 2.3 обеспечивают выполнение расчетов на ПЭВМ электрических цепей при значительном сокращении подготовительных работ и ручных операций. В частности, в них автоматически решается задача составления матрицы инциденций. Однако в ряде случаев целесообразно применять их без автоматического составления матрицы инциденций (тогда она составляется 1 раз и вводится операторами DATA–READ). В инженерной практике одна и та же схема обсчитывается многократно, так как преобладающими являются многовариантные расчеты, связанные с оптимизацией параметров, минимизацией потерь, анализом гармоник и частотных характеристик. И все это при неизменной топологии и (или) неизменных параметрах ветвей. Очевидно, что вводить для каждого варианта большие массивы данных нецелесообразно. Проще записать их на машинные носители и считывать с них по мере необходимости. Для того, чтобы программы, не использующие ПП 3000, сохранили работоспособность, из последней следует перенести в основной текст строки 3000–3002, которые содержат операторы DEF определения функций, так как эти функции используются и в других частях программы. Ограничения на сложность анализируемых электрических цепей в основном определяются машинными ресурсами.

▼ На рис. 2.3 изображен граф связей между приведенными в данной гл. восемью программами. Штриховые линии обозначают сходство решаемых задач (общность назначения программ), линии со стрелками – "генетическую" связь между программами.

При решении практических задач пользователь сам должен сделать выбор, какую из них надо применить в работе.

Если имеющаяся версия БЕЙСИКа содержит матричные операторы, то можно использовать их, так как текст программ будет короче и нагляднее. Но такие программы будут занимать больше места в памяти.

Можно отметить, что наиболее эффективное использование ресурсов, по-видимому, достигается при работе с программами, имеющими обозначения с номерами 2 и 4 (например, МКТ2, МКТ4, МУП4).

Достаточно сложным вопросом является сравнительная оценка программ, так как она затрудняется целым рядом факторов. К их числу относятся топологическая сложность рассчитываемых цепей, технические характеристики ПЭВМ и особенности их операционной системы. Бурное развитие технологии элементной базы вычислительной техники привело к тому, что в настоящее время находятся в эксплуатации ЭВМ, различающиеся по техническим характеристикам на порядок и больше, а их дальнейшее развитие трудно прогнозировать. Это затрудняет оценку эффективности математического обеспечения. Кроме того, применение интерпретаторов или трансляторов дает различие в скорости вычислений на 1–2 порядка, поэтому не представляется возможным выйти за рамки относительных и весьма неточных оценок, не имеющих большой практической ценности.

▼ При практическом освоении программ можно рекомендовать следующую последовательность действий:

1) ввести с клавиатуры текст выбранной программы и записать на машинные носители;

2) ввести исходные данные для тестовой задачи;

3) провести расчет и сравнить с известными результатами;

4) если имеются различия в результатах, то проверить текст, исправить ошибки и снова провести расчет.

При решении собственных задач следует помнить, что требуется изменить ПП 2500, в которой задается вектор источников ЭДС (или источников тока). Кроме того, при использовании МКТ1 и МКТ2, МУП1 и МУП2 необходимо изменить описание массивов, приведя их в соответствие с размерностью задач, как это было описано ранее.

▼ Важнейшим этапом внедрения программ является их тестирование, на что может затрачиваться более 50% всего времени, отведенного на освоение математического обеспечения. На начальной стадии желательно проверить программу на примерах расчета при постоянном токе для определенной регулярной конфигурации (например, лестничные или решетчатые схемы), для которых результаты легко подсчитать заранее, или для схем, изображенных на рис. 2.1 и 2.3. Такое тестирование (и вообще расчет цепи переменного тока при нулевой частоте) позволяет оценить правильность кодирования текста программы и ввода ее в ЭВМ с машинных носителей, проверить укрупненно ее структуру и выявить большую часть ошибок.

В дальнейшем используется более полный тест, охватывающий уже все структурные единицы программы. Наиболее целесообразно провести расчет при искусственно подобранных исходных данных, обеспечивающих получение таких результатов, которые можно оценить иными способами, например аналитически.

В частности, можно рекомендовать выбрать частоту и параметры ветвей (R_i , L_i, C_i) так, чтобы комплексное сопротивление в каждой i-й

ветви было равно $R_i(1+j)$. Наиболее просто это достигается при условиях

$$L_i = R_i;\ C_i = 0;\ f = 1/2\pi = 0{,}159155. \tag{2.17}$$

Рассмотрим более подробно метод контурных токов. При выполнении условий (2.17) матрица сопротивления ветвей равна $\mathbf{R}(1+j)$, где $\mathbf{R}$ – действительная диагональная матрица для случая расчета той же схемы на постоянном токе. Положим теперь, что вектор ЭДС ветвей $\mathbf{U}$ не содержит мнимых компонент. При этих условиях соотношение (2.1) примет вид

$$(\mathbf{SR}(1+j)\mathbf{S}^{\mathrm{T}})(\mathbf{X}+j\mathbf{Y}) = \mathbf{SU}, \tag{2.18}$$

где по-прежнему $\mathbf{S}$—матрица инциденций; $\mathbf{X}+j\mathbf{Y}$ – неизвестный (искомый) вектор контурных токов.

Отсюда можно получить

$$(\mathbf{SRS}^{\mathrm{T}})(\mathbf{X}+j\mathbf{Y}) = 0{,}5(1-j)\mathbf{SU}, \tag{2.19}$$

что эквивалентно двум уравнениям с действительными матрицами

$$\begin{aligned}(\mathbf{SRS}^{\mathrm{T}})\mathbf{X} &= 0{,}5\mathbf{SU};\\ (\mathbf{SRS}^{\mathrm{T}})\mathbf{Y} &= -0{,}5\mathbf{SU}.\end{aligned} \tag{2.20}$$

Решая их относительно $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$, находим

$$\begin{aligned}\mathbf{X} &= 0{,}5\mathbf{Z};\\ \mathbf{Y} &= -0{,}5\mathbf{Z},\end{aligned} \tag{2.21}$$

где $\mathbf{Z} = (\mathbf{SRS}^{\mathrm{T}})^{-1}\mathbf{SU}$ – решение уравнения (2.1) для постоянного тока.

Очевидно, что соотношения между токами в ветвях на переменном токе будут иметь те же коэффициенты пропорциональности.

При условиях (2.17) проведем расчет схемы рис. 2.1 с помощью программы МКТ3. Протокол работы программы приведен ниже.

```
RUN
УКАЖИТЕ ВИД РАБОТЫ,
1. ВВОД ТОПОЛОГИИ СХЕМЫ.
2. ВВОД ТОПОЛОГИИ И ПАРАМЕТРОВ ВЕТВЕЙ
(ВЕТВИ СОДЕРЖАТ ТОЛЬКО R),
3. ВВОД ТОПОЛОГИИ И ПАРАМЕТРОВ ВЕТВЕЙ
(ВЕТВИ СОДЕРЖАТ ЭЛЕМЕНТЫ R, L, C).
?3
ВЕТВЬ № 1
N1, N2, R, L, C= ?0, 2, 6, 6, 0
```

```
ВЕТВЬ № 2
N1, N2, R, L, C= ? 0, 1, 2, 2, 0
ВЕТВЬ № 3
N1, N2, R, L, C= ?1, 2, 1, 1, 0
ВЕТВЬ № 4
N1, N2, R, L, C= ?1, 3, 5, 5, 0
ВЕТВЬ № 5
N1, N2, R, L, C= ? 2, 3, 4, 4, 0
ВЕТВЬ № 6
N1, N2, R, L, C= ? 0, 3, 3, 3, 0
ВЕТВЬ № 7
N1, N2, R, L, C= ?–2, 0, 0, 0, 0
СХЕМА СОДЕРЖИТ 6 ВЕТВЕЙ.
ПЕЧАТЬ ТАБЛИЦЫ ПАРАМЕТРОВ НУЖНА
(1–ДА, 0–НЕТ) ?
?0
F(ГЦ) = ?.159155
ТОКИ В ВЕТВЯХ.
```

N ВЕТВИ	RE(I)	IM(I)
1	–.206612	.206612
2	–.528926	.528926
3	–.181818	.181818
4	–.347108	.347108
5	–.38843	.38843
6	. .735537	–.735537

Сравнив эти данные с приведенными на с. 24 для МКТО, убеждаемся, что в этом случае выполняется соотношение (2.21) и программа МКТЗ работает правильно.

Аналогичные рассуждения можно провести и для метода УП и получить соотношения, подобные (2.21).

Таким образом, при искусственно выбранных значениях параметров ветвей и частоты, соответствующих условиям (2.17), действительная и мнимая части вектора контурных токов будут пропорциональны вектору контурных токов при расчете на постоянном токе с коэффициентами пропорциональности 0,5 и –0,5.

▼ После того как пользователем получены достаточно убедительные подтверждения правильности работы программы, можно рекомендовать

использовать "встроенное тестирование" – добавить в ее структуру фрагмент, содержащий все исходные данные одной из тестовых задач и результаты ее решения. При инициации программы предварительно обрабатывается тестовая задача и полученный результат сравнивается с хранящимся решением. Итоги сравнения выводятся на дисплей, а затем программа переходит к решению текущей задачи.

Все программы, описанные в данной главе, имеют одинаковую структуру и используют одинаково организованные подпрограммы (за исключением ПП 3000, которая составлена по разным алгоритмам для МКТ и МУП), то же относится к структуре и обозначениям массивов. Однако пользователь после освоения этих программ может вносить в них изменения в целях дальнейшего их совершенствования. Эту работу можно разделить на два направления: изменение процедур ввода-вывода и совершенствование алгоритма вычислений.

Модификацию процедур ввода и вывода информации необходимо проводить, если требуется адаптировать программы к имеющейся конфигурации ПЭВМ, приспособить к специфике решаемых задач и уровню квалификации пользователя. Вместо дисплея можно использовать иные средства: при вводе – магнитные ленты и диски, при выводе результатов счета – печать на принтере и запись на магнитные и прочие машинные носители. Диалог с пользователем может быть расширен в целях вывода дополнительных указаний, рекомендаций, сообщений о тех или иных ситуациях. Его следует изменить также при использовании иных средств обмена информацией.

Так, например, при проведении стереотипных вычислений на одинаковых по цели задачах он может быть сокращен. Однако наиболее кардинальные изменения внесут разнообразные средства машинной графики в диалоге. Эти средства, на наш взгляд, – важнейшее направление для улучшения комфортности работы с математическим обеспечением.

Наиболее очевидным направлением совершенствования алгоритмов расчетов является, по-видимому, применение методов обработки слабозаполненных матриц [31] и других приемов, позволяющих сократить время счета в 3–4 раза, а объем необходимой памяти – в 1,5–2 раза [32].

Наконец, отметим, что если реализованная на данной ПЭВМ версия интерпретатора БЕЙСИК позволяет записывать в одной строке несколько операторов, то это также сокращает длительность вычислений.

РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

3.1. Метод редукции

▼ В предыдущей главе были приведены алгоритмы и программы расчета электрических цепей с применением методов контурных токов и узловых потенциалов. Они универсальны, и в этом их основное достоинство. Однако эти методы основаны на использовании операций с матрицами, большинство из которых являются слабозаполненными. Это обстоятельство приводит к снижению вычислительной эффективности программ – увеличению времени счета и потребности в оперативной памяти.

Поэтому наряду с методами КТ и УП в практике электротехнических расчетов на ЭВМ находят применение и другие методы и вычислительные алгоритмы, в том числе – метод редукции или сворачивания электрических цепей, примеры реализации которого на ПЭВМ излагаются в данной главе.

Редукция широко применяется при анализе электронных схем и многополюсных электрических систем, характеризующихся большим количеством элементов и сложной структурой их соединения. Рассматриваемые схемы в целях проведения анализа представляются в виде схем замещения или "расчетных схем" с линейными элементами и не содержащими источников тока и ЭДС, а затем при помощи цепочки эквивалентных преобразований сводятся в общем случае к многоплюснику. Его вершины (полюсы) выделяются заранее в соответствии с постановкой задачи и в преобразованиях не участвуют (не сокращаются). Наиболее простой и в силу этого наиболее распространенный способ преобразования электрических цепей состоит в замене последовательно и параллельно соединенных ветвей одной эквивалентной, что, однако, возможно далеко не всегда. Более сложным представляется преобразование участка схемы, содержащего сопротивления, соединенные треугольником, в трехлучевую звезду, а также преобразование участка со звездообразным соединением в многоугольник. В последнем случае применение ЭВМ наиболее целесообразно, поскольку объем вычислений становится значительным и зависит от числа сторон результирующего многоугольника. Отметим, что известны и другие виды преобразований [33, 34], однако в данной главе они не рассматриваются.

Многие пользователи считают метод редукции более простым и надежным, чем иные методы расчета, обеспечивающим минимум ошибок и хорошие возможности контроля при реализации на ЭВМ. Последнее основано на том, что метод состоит в программировании цепочки эквивалентных преобразований, отражающих каждый шаг "ручного" сворачивания цепи до представления ее многополюсником (в частном случае – двухполюсником).

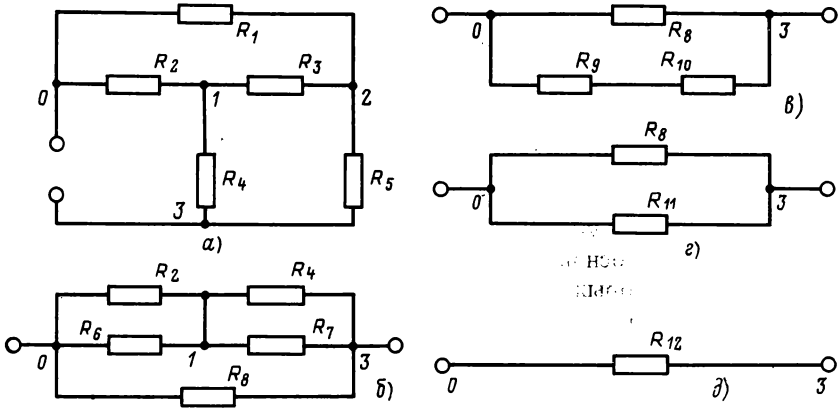


Рис. 3.1. Последовательность эквивалентных преобразований тестовой схемы

Такой подход эквивалентен в математическом смысле решению системы линейных уравнений методом последовательного исключения неизвестных. Алгоритм редукции по существу является одним из вариантов решения систем линейных уравнений по методу Гаусса (прямой ход). Проблема выбора текущего номера устраняемого узла здесь аналогична выбору главного элемента при решении системы [35]. Программа, разработанная по такому методу, проще тестируется (можно проконтролировать каждый шаг расчета), а массивы, необходимые для вычислений, требуют значительно меньшего объема памяти. И хотя программа, реализующая свертывание с использованием эквивалентных преобразований, длиннее описанных ранее в гл. 2 и не обладает универсальностью, более того, она составляется каждый раз практически заново для цепей с новой топологией, однако ее разработка и особенно использование иногда могут быть весьма эффективными. При проведении многовариантных расчетов с повышенной кратностью повторения целесообразно вместо методов КТ и УП применять метод редукции.

▼ Метод редукции позволяет, как отмечалось выше, преобразовывать схемы, не содержащие источников тока и ЭДС, т.е. состоящие только из пассивных элементов. В качестве примера рассмотрим схему, изображенную на рис. 3.1, *а* и полученную из схемы, приведенной на рис. 2.1, удалением ветви, содержащей источник ЭДС. Решим задачу: рассчитать эквивалентное сопротивление этой схемы относительно узлов 0 и 3 на постоянном токе.

На рис. 3.1, *б – д* показаны последовательные этапы преобразования тестовой схемы в двухполюсник (отметим, что последовательность операций сворачивания может быть и иной). Соответствующие этим этапам

последовательные эквивалентные преобразования выражаются соотношениями

$$
\begin{aligned}
R_6 &= R_1 + R_3 + R_1R_3/R_5;\\
R_7 &= R_3 + R_5 + R_3R_5/R_1;\\
R_8 &= R_5 + R_1 + R_5R_1/R_3;\\
R_9 &= R_2R_6/(R_2 + R_6);\\
R_{10} &= R_4R_7/(R_4 + R_7);\\
R_{11} &= R_9 + R_{10};\\
R_{12} &= R_8R_{11}/(R_8 + R_{11}),
\end{aligned}
\qquad (3.1)
$$

где R_{12} – результирующее (эквивалентное) сопротивление двухполюсника.

По этим соотношениям, которые представляют собой алгоритм эквивалентирования, составим программу на БЕЙСИКе. Назовем ее ПРЭС0 (программа расчета эквивалентной схемы). Текст ее приведен ниже.

```
900  REM ************************************
902  REM * ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ *
904  REM * МЕТОДОМ РЕДУКЦИИ. ПОСТОЯННЫЙ ТОК.  *
906  REM * НАЗВАНИЕ: "ПРЭСО" .               *
908  REM ************************************
1000  DATA 6,2,1,5,4
1010  READ R1,R2,R3,R4,R5
1020  LET R6=R1+R3+R1*R3/R5
1030  LET R7=R3+R5+R3*R5/R1
1040  LET R8=R5+R1+R5*R1/R3
1050  LET R9=R2*R6/(R2+R6)+R4*R7/(R4+R7)
1060  LET R=R8*R9/(R8+R9)
1070  PRINT "СОПРОТИВЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА"
1080  PRINT "R=";R
9999  END
```

Проводя расчет при R_1 = 6 Ом, R_2 = 2 Ом, R_3 = 1 Ом, R_4 = 5 Ом, R_5 = 4 Ом, получаем искомое сопротивление двухполюсника $R_э$ = = 3,79775 Ом.

▼ Положим, что в той же схеме в каждой ее ветви имеются активные и реактивные элементы *R, L, C.* Разработаем программу ПРЭС1 для расчета этой схемы на переменном токе, т.е. найдем эквивалентное сопротивление двухполюсника при частоте F.

Известен прием, облегчающий проведение практических расчетов: прежде, чем проводить расчет на переменном токе (вручную или с помощью ЭВМ), сначала составляют последовательность эквивалентных преобразований для расчета на постоянном токе в виде соотношений, похожих на (3.1), а затем переписывают их с учетом комплексных сопротивлений. Для нас таким конспектом, планом или наброском алгоритма будет служить программа ПРЭС0. В ней каждую арифметическую операцию с действительными числами следует заменить обращением к подпрограммам, выполняющим операции с комплексными числами.

Для данной схемы нужны четыре ПП: умножения и деления комплексных чисел, замены параллельных ветвей, а также вспомогательная ПП (их номера 2500, 2540, 2590 и 2690). Обращение к ним целесообразно унифицировать, что уменьшает вероятность появления ошибок.

Вызов первых трех ПП производится одинаково. Исходные данные для них (комплексные числа) заносятся в первую и вторую строки вспомогательного массива Z, а результат по окончании работы ПП размещается в третьей строке того же двухмерного массива. В нем в первом столбце должна находиться действительная часть, а во втором – мнимая часть комплексного числа. Вспомогательная ПП 2690 позволяет экономно заменить строки 1020–1040 в программе ПРЭС0 на эквивалентные при расчете на переменном токе.

Использование этих ПП позволяет существенно упорядочить написание довольно длинного текста программы расчета тестовой схемы. В программе предусмотрены: а) ввод исходных данных, в том числе значения частот при анализе на переменном токе; б) подготовка таблицы сопротивлений; в) проведение последовательности преобразований в соответствии с порядком свертывания; 7) вывод результатов.

Как и в программах МКТ и МУП, приведенных в гл. 2, в программе ПРЭС1 подготовка топологии и ввод параметров ветвей осуществляется с помощью ПП 2000 (однако не универсальной, тескт которой приведен в гл. 1, а написанной специально для ПРЭС1). Формирование таблицы и последовательные этапы эквивалентных преобразований осуществляются ПП 1500. Эти ПП вызываются из головной программы (строки с номерами 1000–1100), где вводится также и значение частоты. Такая блочная структура облегчает видоизменение ГП, необходимое при переходе к расчету другой схемы. Текст программы ПРЭС1 приведен ниже, а о методике ее тестирования см. в § 3.4.

```
990  REM ************************************
992  REM * ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ *
994  REM * МЕТОДОМ РЕДУКЦИИ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК.  *
996  REM * НАЗВАНИЕ: "ПРЭС1" .               *
998  REM ************************************
```

```
1000  DIM R[10],M[10],L[5],C[5].Z[5,2]
1010  GOSUB 2000
1020  PRINT "F=";
1030  INPUT F
1040  GOSUB 1500
1050  PRINT "RE(Z)=";Y1,"IM(Z)=";Y2
1060  PRINT "РАСЧЕТ ПРИ ДРУГОЙ ЧАСТОТЕ ПОВТОРИТЬ"
1070  PRINT "(1-ДА,0-НЕТ) ?"
1080  INPUT Y
1090  IF Y=1 THEN 1020
1100  STOP
1490  REM ********************************
1492  REM * ВЫЧИЛЕНИЕ RE(Z) И IM(Z)      *
1494  REM * ДВУХПОЛЮСНИКА ПРИ ЧАСТОТЕ F. *
1496  REM ********************************
1500  LET W=2*3.14159*F
1510  FOR I=1 TO 5
1520  LET M[I]=W*L[I]
1530  IF W*C[I]=0 THEN 1550
1540  LET M[I]=M[I]-1/W/C[I]
1550  NEXT I
1560  FOR I=1 TO 3
1570  LET J=I*2-1
1580  FOR K=1 TO 3
1590  LET L=J+K*2-2
1600  LET M=L-INT(L/6)*6
1610  LET Z[K,1]=R[M]
1620  LET Z[K,2]=M[M]
1630  NEXT K
1640  GOSUB 2700
1650  LET R[5+I]=Z[4,1]
1660  LET M[5+I]=Z[4,2]
1670  NEXT I
1680  LET Z[1,1]=R[2]
1690  LET Z[1,2]=M[2]
1700  LET Z[2,1]=R[6]
1710  LET Z[2,2]=M[6]
1720  GOSUB 2600
1730  LET R[9]=Z[3,1]
1740  LET M[9]=Z[3,2]
1750  LET Z[1,1]=R[4]
```

```
1760  LET Z[1,2]=M[4]
1770  LET Z[2,1]=R[7]
1780  LET Z[2,2]=M[7]
1790  GOSUB 2600
1800  LET Z[1,1]=R[8]
1810  LET Z[1,2]=M[8]
1820  LET Z[2,1]=R[9]+Z[3,1]
1830  LET Z[2,2]=M[9]+Z[3,2]
1840  GOSUB 2600
1850  LET Y1=Z[3,1]
1860  LET Y2=Z[3,2]
1870  RETURN
1990  REM *************************
1992  REM * ВВОД ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ *
1994  REM *************************
2000  DATA 6,6,0
2010  DATA 2,2,0
2020  DATA 1,1,0
2030  DATA 5,5,0
2040  DATA 4,4,0
2050  FOR I=1 TO 5
2060  READ R[I],L[I],C[I]
2070  NEXT I
2080  RESTORE
2090  RETURN
2500  REM *************
2502  REM * УМНОЖЕНИЕ *
2504  REM *************
2510  LET Z[3,1]=Z[1,1]*Z[2,1]-Z[1,2]*Z[2,2]
2520  LET Z[3,2]=Z[1,1]*Z[2,2]+Z[2,1]*Z[1,2]
2530  RETURN
2540  REM ************
2542  REM * ДЕЛЕНИЕ *
2544  REM ************
2550  LET Z=Z[2,1]*Z[2,1]+Z[2,2]*Z[2,2]
2560  LET Z[3,1]=(Z[1,1]*Z[2,1]+Z[1,2]*Z[2,2])/Z
2570  LET Z[3,2]=(Z[2,1]*Z[1,2]-Z[1,1]*Z[2,2])/Z
2580  RETURN
2590  REM *******************************
2592  REM * ЗАМЕНА ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ     *
2594  REM * СОПРОТИВЛЕНИЙ ЭКВИВАЛЕНТНЫМ *
```

```
2596  REM ******************************
2600  LET Z[4,1]=Z[1,1]+Z[2,1]
2610  LET Z[4,2]=Z[1,2]+Z[2,2]
2620  GOSUB 2510
2630  LET Z[1,1]=Z[3,1]
2640  LET Z[1,2]=Z[3,2]
2650  LET Z[2,1]=Z[4,1]
2660  LET Z[2,2]=Z[4,2]
2670  GOSUB 2550
2680  RETURN
2690  REM ***********************
2692  REM * ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ПП *
2694  REM ***********************
2700  LET Z[5,1]=Z[1,1]+Z[2,1]
2710  LET Z[5,2]=Z[1,2]+Z[2,2]
2720  LET Z[4,1]=Z[3,1]
2730  LET Z[4,2]=Z[3,2]
2740  GOSUB 2620
2750  LET Z[4,1]=Z[3,1]+Z[5,1]
2760  LET Z[4,2]=Z[3,2]+Z[5,2]
2770  RETURN
9999  END
```

3.2. Подпрограммы эквивалентных преобразований

Если проанализировать процесс свертывания электрических цепей, например, схемы, изображенной на рис. 2.1, то можно заметить, что он состоит из преобразования звезда – треугольник, трех преобразований параллельно соединенных ветвей и одного преобразования последовательно соединенных ветвей. Очевидно, что, разработав нужные ПП, можно сократить длину ГП (что особенно будет эффективно для программ достаточно сложных) и улучшить ее структуру и наглядность. Закодировать формулы, по которым производятся преобразования (см., например, [27] и другие учебники ТОЭ), не составит большого труда.

Однако существуют причины, по которым целесообразно использовать ПП с более сложной структурой по сравнению с теми, что были использованы ранее. Во-первых, при обмене информаций между ГП и ПП необходимо пересылать большое количество входных и выходных величин. При использовании языка БЕЙСИК эти процедуры требуют особого внимания: в целях повышения их эффективности (увеличения скорости расчета, уменьшения длины текста) следует организовать их

особым образом. Во-вторых, необходимо строго описывать и соблюдать порядок размещения результатов вычислений. Особенно это относится к случаю преобразования многолучевая звезда – многоугольник, когда число лучей звезды больше трех, что приводит к значительному увеличению количества выходной информации.

Поэтому были разработаны такие варианты ПП эквивалентных преобразований, которые позволяют создать некоторую единую систему, построенную по единому плану с унифицированным способом передачи данных из ГП в ПП и обратно, что упрощает процедуры обмена.

Все эти ПП предназначены для преобразования схем как на постоянном, так и на переменном токе (для различения этих режимов введен ключ: Z$\emptyset$ = 1 для первого случая и Z$\emptyset$ = 2 для второго случая). Они в свою очередь используют ПП, выполняющие операции с комплексными числами (см. ПП4210, ПП4220 и др. в гл. 5).

Общая особенность ПП состоит в том, что исходные данные для них (сопротивления ветвей преобразуемой схемы) должны быть размещены в двухмерном массиве Z, который при Z$\emptyset$ = 1 содержит два столбца (в первом записывается сопротивление, во втором – упакованные по два номера узлов), а при Z$\emptyset$ = 2 массив имеет три столбца (в первом и втором из них размещаются действительная и мнимая части комплексного сопротивления, в третьем – номера узлов). Введение специального массива Z для исходных данных, промежуточных и конечных результатов позволяет упростить обращение к ПП, отказавшись от многочисленных присвоений и пересылок, что особенно важно при расчетах на переменном токе для схем, имеющих достаточно сложную топологию. При этом сокращается длина программы, а быстродействие ее возрастает.

Задание ветви схемы номерами смежных узлов и упаковка этих номеров производятся так, как это описано в гл. 1 в ПП 2000.

Необходимость иметь дополнительный массив Z (как известно, с помощью ПП 2000 исходные данные вводятся в массив P) с иной структурой размещения информации, отличной от массива P, обусловлена стремлением сохранить исходные данные и повысить эффективность программ.

Перейдем к описанию ПП эквивалентных преобразований.

```
4000  REM ***************************
4001  REM * ВЫДЕЛЕНИЕ НОМЕРОВ УЗЛОВ *
4002  REM ***************************
4010  LET U=Z0+1
4012  LET U1=Z[Z1,U]
4014  LET U2=Z[Z2,U]
4016  LET U3=FNA(U1)
4018  LET U4=(U3-FNA(U2))*(U3-FNB(U2))
```

```
4020  LET U4=SGN(ABS(U4))
4022  LET U3=U3*(1-U4)+FNB(U1)*U4
4024  LET U1=FNA(U1)+FNB(U1)-U3
4026  LET U2=FNA(U2)+FNB(U2)-U3
4028  IF U1<U2 THEN 4036
4030  LET U4=U1
4032  LET U1=U2
4034  LET U2=U4
4036  RETURN
4037  REM ********************************
4038  REM * ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ *
4039  REM ********************************
4040  GOSUB 4000
4042  LET Z[Z3,U]=U1+U2/N0
4044  GOSUB 4210
4046  RETURN
4047  REM ****************************
4048  REM * ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНЕИЕ *
4049  REM ****************************
4050  LET Z[Z3,Z0+1]=Z[Z1,Z0+1]
4052  GOSUB 4290
4054  RETURN
4055  REM ****************************************
4056  REM * ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТРЕУГОЛЬНИК-ЗВЕЗДА    *
4057  REM * И МНОГОЛУЧЕВАЯ ЗВЕЗДА-МНОГОУГОЛЬНИК *
4058  REM ****************************************
4060  GOSUB 4320
4062  LET K=Z1-1
4064  LET K1=3*(1-K)+Z2*K
4066  LET K2=Z3+(K1-1)*K1/2-K1+1
4068  LET K3=K2
4070  LET K4=Z4-K2-1
4072  IF K4 >= 0 THEN 4078
4074  PRINT "В МАССИВЕ Z НЕ ХВАТАЕТ ";ABS(K4);" СТРОК."
4076  STOP
4078  LET Z2=Z4
4080  LET Z[Z2,1]=0
4082  IF Z0=1 THEN 4086
4084  LET Z[Z2,2]=0
4086  FOR K=1 TO K1
4088  LET Z1=K[K]
```

```
4090  IF Z5=1 THEN 4098
4092  LET Z3=Z4-1
4094  GOSUB 4270
4096  LET Z1=Z3
4098  LET Z3=Z2
4100  GOSUB 4210
4102  NEXT K
4104  FOR K=K1 TO 2 STEP -1
4106  FOR K0=K-1 TO 1 STEP -1
4108  LET Z1=K[K]
4110  LET Z2=K[K0]
4112  LET K5=K1+K2-Z7
4114  IF K2 <= Z7 THEN 4124
4116  LET Z3=K2
4118  IF K2=K3 THEN 4126
4120  LET K[K5]=K2
4122  GOTO 4126
4124  LET Z3=K[K5]
4126  GOSUB 4164
4128  GOSUB 4220
4130  LET Z1=Z3
4132  LET Z2=Z4
4134  IF Z5=2 THEN 4140
4136  GOSUB 4240
4138  GOTO 4142
4140  GOSUB 4220
4142  LET K2=K2-1
4144  NEXT K0
4146  NEXT K
4148  LET Z[K[1],U]=Z[K3,U]
4150  LET Z[K[1],1]=Z[K3,1]
4152  IF Z0=1 THEN 4156
4154  LET Z[K[1],2]=Z[K3,2]
4156  GOSUB 4330
4158  LET Z2=K1*(K1-1)/2
4160  LET Z3=K3-1
4162  RETURN
4164  GOSUB 4010
4166  IF Z5=2 THEN 4174
4168  LET U1=U3
4170  LET U2=Z6
```

```
4172  GOSUB 4028
4174  LET Z[Z3,U]=U1+U2/NO
4176  RETURN
```

▼ ПП 4040 предназначена для замены двух последовательно соединенных ветвей одной эквивалентной. До обращения к ней помимо ZØ следует указать номера строк Z1 и Z2 массива Z, в которых содержится информация об объединяемых ветвях, а в переменной Z3 указать номер строки массива Z, в которую заносятся результаты вычислений.

▼ ПП 4050 позволяет заменить две параллельно соединенные ветви схемы. При обращении к ней кроме параметров ZØ – Z3, имеющих тот же смысл, что и в ПП 4040, нужно в Z4 указать номер вспомогательной строки для хранения промежуточного результата в массиве Z.

▼ ПП 4060 имеет более универсальный характер и предназначена для преобразования треугольник – звезда (параметр Z1 = 1) и многолучевая звезда – многоугольник (Z1 = 2).

При Z1 = 1 перед вызовом ПП следует указать в Z2 номер центрального узла звезды, в Z3 – номер последней занятой строки массива Z, а в Z4 – общее число строк этого массива. Кроме того, в одномерном массиве K нужно перечислить номера тех строк массива Z, в которых содержится информация о ветвях треугольника, подлежащего преобразованию. По окончании работы ПП результаты преобразования (сопротивления лучей звезды и номера узлов для этих лучей) помещаются в массив Z на место исходных данных.

Для преобразования многолучевая звезда – многоугольник (Z1 = 2) нужно положить Z2 равным числу лучей звезды, а Z3 и Z4, задать так же, как и в предыдущем случае. В массиве K указываются номера строк исходных данных.

▼ По окончании работы ПП результаты (сопротивления сторон многоугольника и номера их узлов) размещаются на месте исходных данных, а также последовательно после последней занятой строки массива Z (т.е. начиная со строки Z3 + 1). Напомним, последнее необходимо в связи с тем, что при числе лучей звезды больше трех число сторон многоугольника больше числа лучей звезды. В массив K заносятся номера строк, в которых размещены результаты. Z2 содержит число сторон многоугольника, Z3 – номер последней занятой строки в массиве Z.

Если в процессе работы размерность массива Z, предусмотренная в тексте программы, окажется недостаточной для размещения результатов, то ПП 4060 выдает сообщение

В МАССИВЕ Z НЕ ХВАТАЕТ ... СТРОК

и выполнение программы прерывается. Тогда нужно увеличить размерность массива Z и снова запустить программу на выполнение. Такое

диагностическое сообщение позволяет быстрее обнаружить ошибки и ускоряет выбор нужной размерности массива.

Все ПП используют ПП 4010, которая производит распаковку номеров узлов и другие операции с ними.

Применяемые в ПП функции FNA и FNB должны быть определены в ГП так, как это сделано, например, в МКТ1 (см. гл. 2).

Используя все перечисленные процедуры для расчета тестовой схемы, получаем новую программу ПРЭС2, которая является аналогом ПРЭС1, но отличается более совершенной структурой. О том, как ее испытать, см. § 3.4.

```
990  REM ************************************
992  REM * ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ *
994  REM * МЕТОДОМ РЕДУКЦИИ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК.  *
996  REM * НАЗВАНИЕ: "ПРЭС2" .               *
998  REM ************************************
1000  DIM Z[10,3],K[10],N[5],R[5],L[5],C[5]
1010  DEF FNA(A)=INT(ABS(A))
1020  DEF FNB(B)=INT((ABS(B)-FNA(B))*NO+.5)
1030  GOSUB 2000
1040  PRINT "F(ГЦ)=";
1050  INPUT F
1060  GOSUB 1500
1070  PRINT "RE(Z)=";Y1,"IM(Z)=";Y2
1080  PRINT "РАСЧЕТ ПРИ ДРУГОЙ ЧАСТОТЕ ПОВТОРИТЬ"
1090  PRINT "(1-ДА,0-НЕТ) ?"
1100  INPUT Y
1110  IF Y=1 THEN 1040
1120  STOP
1490  REM ********************************
1492  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ RE(Z) И IM(Z)      *
1494  REM * ДВУХПОЛЮСНИКА ПРИ ЧАСТОТЕ F   *
1496  REM ********************************
1500  LET W=2*3.14159*F
1510  FOR I=1 TO 5
1520  LET Z[I,1]=R[I]
1530  LET Z[I,2]=W*L[I]
1540  IF C[I]*W=0 THEN 1560
1550  LET Z[I,2]=Z[I,2]-1/W/C[I]
1560  LET Z[I,3]=N[I]
1570  NEXT I
1580  LET ZO=2
```

```
1590  LET Z1=2
1600  LET Z2=3
1610  LET Z3=5
1620  LET Z4=10
1630  LET K[1]=1
1640  LET K[2]=3
1650  LET K[3]=5
1660  GOSUB 4060
1670  LET Z1=1
1680  LET Z2=4
1690  LET Z3=1
1700  GOSUB 4050
1710  LET Z1=2
1720  LET Z2=3
1730  LET Z3=2
1740  GOSUB 4050
1750  LET Z1=2
1760  LET Z2=1
1770  LET Z3=1
1780  GOSUB 4040
1790  LET Z1=1
1800  LET Z2=5
1810  LET Z3=1
1820  GOSUB 4050
1830  LET Y1=Z[1,1]
1840  LET Y2=Z[1,2]
1850  RETURN
1990  REM ************************
1992  REM * ВВОД ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ *
1994  REM ************************
2000  DATA 0,2,6,6,0
2010  DATA 0,1,2,2,0
2020  DATA 1,2,1,1,0
2030  DATA 1,3,5,5,0
2040  DATA 2,3,4,4,0
2050  LET NO=100
2060  FOR I=1 TO 5
2070  READ K,L,R[I],L[I],C[I]
2080  LET N[I]=K*NO+L
2090  NEXT I
2100  RETURN
9999  END
```

3.3. Автоматизированные методы расчета

▼ Как уже отмечалось ранее, программы, реализующие метод редукции, являются по необходимости уникальными – для каждой новой цепи с конкретной топологией нужно разрабатывать новую программу. А это связано с большими трудозатратами на кодирование, отладку и тестирование программ. Второй их недостаток состоит в том, что при числе ветвей цепи более 15–20 усложняется процесс составления алгоритма программы свертывания схемы, так как нужно предусмотреть безошибочную подготовку промежуточных данных для передачи их в очередную подпрограмму эквивалентного преобразования, а после получения результатов ее работы следует правильно разместить их в соответствующем месте массива. Затруднения вызывают и некоторые другие детали процесса вычислений. Такое положение малопривлекательно. Можно считать, что без преодоления перечисленных трудностей метод редукции не может быть положен в основу достаточно совершенного математического обеспечения.

▼ Создание более совершенных программ расчета методом редукции возможно на пути стандартизации ввода-вывода и использования подпрограмм типа ПП 4040 – ПП 4060, в которых организован экономный способ обмена информаций между ГП и ПП. Еще одним направлением совершенствования программ является автоматизация процесса составления последовательности эквивалентных преобразований (алгоритма редукции). Можно выделить три уровня автоматизации. В первом случае пользователь сам решает, в каком порядке осуществлять процесс вычислений, вводит указания о выбранном подмножестве ветвей и код эквивалентного преобразования, которое надо произвести над ними (или номер соответствующей ПП из числа приведенных в § 3.2). В ЭВМ организуются нужные пересылки и присвоения, вызывается указанная ПП, результат ее работы выводится на экран. Далее процедура повторяется. От такой программы нетрудно сделать еще один шаг: после получения списка очередного подмножества преобразуемых ветвей автоматически определить код преобразования, произвести вызов ПП и разместить результаты ее работы в нужном месте рабочего массива. Подобный способ организации вычислений использован в приведенной далее программе ПРЭС3.

Наконец, наиболее высокий уровень автоматизации означает наличие алгоритма, полностью исключающего вмешательство пользователя (исключается диалоговый ввод указаний, что существенно сокращает общую длительность работы). В этом случае программа выбирает те или иные группы ветвей, определяет нужные процедуры, выполняет их с учетом установленных условий и ограничений. (Такой алгоритм будет реализован в программе ПРЭС4 – см. далее). В данном параграфе речь будет идти о программах, соответствующих разным уровням автоматизации вычислений.

▼ Описываемая ниже ПРЭС3 является универсальной – она предназначена для расчетов на постоянном и переменном токах схем с произвольной топологией методом эквивалентных преобразований. Во-первых, такая универсальность достигается за счет использования ПП 2000 (см. гл. 1) для ввода данных. Во-вторых, после ввода параметров ветвей и топологии пользователь в режиме диалога указывает последовательно один этап преобразования за другим. Причем после каждого очередного сеанса ввода указаний эти преобразования тут же выполняются и ему снова предлагается выбрать очередной участок цепи, который нужно свернуть. Процесс принятия решения облегчается при использовании таблицы, которая отображается на экране дисплея и содержит промежуточные результаты – всю информацию о схеме после завершения очередного этапа преобразований (перечень номеров ветвей, узлов и величин сопротивлений).

Эта таблица выводится на экран с помощью ПП 9000.

```
900  REM ************************************
902  REM * ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ *
904  REM * ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ МЕТОДОМ    *
906  REM * РЕДУКЦИИ. ПОСТОЯННЫЙ И ПЕРЕМЕННЫЙ *
908  REM * ТОК. НАЗВАНИЕ: "ПРЭС3" .          *
910  REM ************************************
1000  DIM Z[100,3],P[200,4],K[50]
1010  DEF FNA(A)=INT(ABS(A))
1020  DEF FNB(B)=INT((ABS(B)-FNA(B))*NO+.5)
1030  GOSUB 2000
1040  PRINT "УКАЖИТЕ ЗНАЧЕНИЕ ЧАСТОТЫ F В ГЦ"
1050  PRINT "(F=0 ОЗНАЧАЕТ, ЧТО РАСЧЕТЫ ПРОВОДЯТСЯ"
1060  PRINT "ДЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА)."
1070  INPUT F
1080  LET W=2*3.14159*F
1090  LET ZO=1+SGN(F)
1100  FOR I=1 TO N1
1110  LET Z[I,1]=P[I,2]
1120  IF F=0 THEN 1160
1130  LET Z[I,2]=W*P[I,3]
1140  IF P[I,4]=0 THEN 1160
1150  LET Z[I,2]=Z[I,2]-1/W/P[I,4]
1160  LET Z[I,ZO+1]=P[I,1]
1170  NEXT I
1180  LET N8=N1
1190  LET N9=N2
```

```
1200  PRINT "ТАВЛИЦА СОПРОТИВЛЕНИЙ ВЕТВЕЙ СХЕМЫ"
1210  GOSUB 9000
1220  PRINT "СОЕДИНЕНИЕ (1-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ,2-ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ,"
1230  PRINT "3-ТРЕУГОЛЬНИКОМ,4-ЗВЕЗДОЙ,0-КОНЕЦ РАБОТЫ) =";
1240  INPUT N
1250  IF N=0 THEN 1710
1260  IF N=1 THEN 1320
1270  IF N=2 THEN 1370
1280  IF N=3 THEN 1490
1290  IF N=4 THEN 1540
1300  PRINT "КОД НЕВЕРЕН. ВВЕДИТЕ ЕЩЕ РАЗ."
1310  GOTO 1220
1320  PRINT "НОМЕРА ДВУХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ВЕТВЕЙ =";
1330  INPUT Z1,Z2
1340  LET Z3=Z1
1350  GOSUB 4040
1360  GOTO 1420
1370  PRINT "НОМЕРА ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ВЕТВЕЙ =";
1380  INPUT Z1,Z2
1390  LET Z3=Z1
1400  LET Z4=N8+1
1410  GOSUB 4050
1420  LET N8=N8-1
1430  FOR I=Z2 TO N8
1440  FOR J=1 TO ZO+1
1450  LET Z[I,J]=Z[I+1,J]
1460  NEXT J
1470  NEXT I
1480  GOTO 1680
1490  PRINT "НОМЕРА ТРЕХ ВЕТВЕЙ, СОЕДИНЕННЫХ ТРЕУГОЛЬНИКОМ, =";
1500  INPUT K[1],K[2],K[3]
1510  LET Z2=N9+1
1520  LET N9=Z2
1530  GOTO 1630
1540  PRINT "НОМЕР ЦЕНТРАЛЬНОГО УЗЛА ЗВЕЗДЫ =";
1550  INPUT U
1560  LET Z2=0
1570  FOR I=1 TO N8
1580  LET J=Z[I,ZO+1]
1590  IF (FNA(J)-U)*(FNB(J)-U)#0 THEN 1620
1600  LET Z2=Z2+1
```

```
1610  LET K[Z2]=I
1620  NEXT I
1630  LET Z1=N-2
1640  LET Z3=N8
1650  LET Z4=100
1660  GOSUB 4060
1670  LET N8=Z3
1680  PRINT "ТАБЛИЦА ПОСЛЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ"
1690  GOSUB 9000
1700  GOTO 1220
1710  PRINT "РАСЧЕТ ДЛЯ ТОЙ ЖЕ СХЕМЫ ПОВТОРИТЬ (1-ДА,0-НЕТ)";
1720  INPUT N
1730  IF N=0 THEN 1760
1740  IF F=0 THEN 1080
1750  GOTO 1040
1760  PRINT "ВВЕСТИ НОВУЮ СХЕМУ (1-ДА,0-НЕТ)";
1770  INPUT N
1780  IF N=1 THEN 1030
1790  STOP
8900  REM **********************
8902  REM * ПП ПЕЧАТИ ТАБЛИЦЫ *
8904  REM **********************
9000  IF Z0=2 THEN 9030
9010  PRINT "N ВЕТВИ","N1.N2","R"
9020  GOTO 9040
9030  PRINT "N ВЕТВИ","N1.N2","RE(Z)","IM(Z)"
9040  PRINT "---------------"
9050  FOR I=1 TO N8
9060  IF Z0=2 THEN 9090
9070  PRINT I,Z[I,2],Z[I,1]
9080  GOTO 9100
9090  PRINT I,Z[I,3],Z[I,1],Z[I,2]
9100  NEXT I
9110  PRINT "---------------"
9120  RETURN
9999  END
```

Если в распоряжении пользователя имеется такая версия языка БЕЙСИК, которая предусматривает применение средств машинной графики, то целесообразно заменить ПП 9000 на ПП, которая на каждом этапе свертывания выводила бы на экран преобразованную (свернутую)

схему. Такой подход обеспечит большую наглядность результатов и ускорит принятие решения при выборе очередного шага, а следовательно, сократит и общее время вычислений.

После выбора пользователем очередного участка схемы и типа преобразования (что также должно быть введено в диалоговом режиме) программа вызывает соответствующие процедуры, производит вычисления в автоматическом режиме (в том числе и все пересылки входной и выходной информации для каждой ПП), размещает результаты преобразований в памяти и выдает сообщение о завершении данного этапа расчета. Процесс циклически повторяется и может быть остановлен в любой момент, что позволяет свертывать цепь не только до двухполюсника, но в случае необходимости (такие случаи часты в практике расчетов) и до многополюсника.

Для обеспечения работоспособности программы важное значение имеет правильное задание величины массивов. Описание размерности массивов в неявной форме для расчета на постоянном токе задается строкой

```
1000 DIM P(M1,2), Z(M2,2), K(M2)
```

и для переменного тока

```
1000 DIM P(M1,4), Z(M2,3), K(M2)
```

В эти строки при вводе программы с клавиатуры следует подставить нужные численные значения: M1 – число ветвей схемы, M2 = 2 × M1.

Тестирование программы целесообразно провести по методам, изложенным в § 3.4.

Программа ПРЭС3 сокращает долю ручного труда, значительно повышает комфортность работы пользователя и, наконец, является универсальной – применимой к схемам произвольной топологической сложности.

При многократном использовании ее для расчета – многовариантного анализа цепи с одной и той же топологией, но с разными параметрами ветвей (оптимизация, учет статистических факторов, расчет при разных частотах) – можно рекомендовать после проведения однократного расчета вывести на машинный носитель последовательность этапов свертывания и при последующих вычислениях использовать ее, исключив повторение каждый раз диалога. Той же цели можно достигнуть, записав последовательность свертывания в операторе DATA и несколько изменив текст программ.

▼ Перейдем к описанию программы ПРЭС4, основная особенность которой заключается в осуществлении в автоматическом режиме выбора алгоритма редукции без вмешательства оператора.

Ввод данных в ней осуществляется с помощью ПП 2000 (см. гл. 1). После запуска программы и ввода параметров ветвей и топологии це-

пи следует, отвечая на соответствующий запрос, ввести список узлов, которые не должны участвовать в преобразованиях. Если, например, ставится задача представить исходную схему двухполюсником, то вводятся номера только двух узлов, которые в процессе вычислений не сокращаются.

Алгоритм той части программ, которая производит автоматическое сворачивание схемы, построен следующим образом.

1. Выявляются последовательно соединенные ветви, и в каждом случае они заменяются одной эквивалентной ветвью с помощью ПП 4040 (при этом один или более узлов выпадают из дальнейшего рассмотрения).

2. Выделяются все параллельные ветви, и каждая группа параллельных ветвей заменяется с помощью ПП 4050 одной эквивалентной ветвью при сохранении общих узлов.

3. Процедуры по п. 1 и 2 выполняются до тех пор, пока не будут выявлены и эквивалентированы все подобные соединения.

4. После выполнения п. 1–3 проводится проверка условия окончания работы: достигнут ли заданный список узлов, относительно которых производится эквивалентирование. Если это условие выполняется, то работа по свертыванию заканчивается – производится переход на п. 7.

5. Если условие окончания работы не выполняется, то выявляется звезда с минимальным числом лучей (выявляется узел с минимальной степенью связности), которая преобразуется в многоугольник с помощью ПП 4060.

6. Производится переход на п. 1, и все действия повторяются.

7. При выходе из п. 4 работа по преобразованию схемы завершается, и выводятся результаты расчета.

Особенностью алгоритма является то, что в нем не используется преобразование треугольник–звезда. Это объясняется тем, что при использовании табличного представления информации о топологии схемы звезду выбрать легче, чем треугольник, так как во втором случае возникают значительные трудности с определением ветвей, образующих треугольник. Кроме того, встречаются цепи, расчет которых при использовании обоих преобразований (треугольник – звезда и звезда – треугольник) приводит к зацикливанию программы.

Программа ПРЭС4 работает в режиме диалога, и пользователю остается лишь отвечать на вопросы, выдаваемые программой после ее инициирования.

```
980  REM ************************************
982  REM * ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ *
984  REM * ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ МЕТОДОМ    *
986  REM * РЕДУКЦИИ. ПОСТОЯННЫЙ И ПЕРЕМЕННЫЙ *
988  REM * ТОК. НАЗВАНИЕ: "ПРЭС4" .          *
990  REM ************************************
```

```
1000  DIM Z[80,3],P[80,4],N[30],U[3]
1002  REM--------
1004  REM ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
1006  REM--------
1008  GOSUB 2000
1010  PRINT "ВВЕДИТЕ НОМЕРА УЗЛОВ (U), ОТНОСИТЕЛЬНО"
1012  PRINT "КОТОРЫХ НУЖНО ПРЕОБРАЗОВАТЬ СХЕМУ."
1014  PRINT "U=-1 ПОЗВОЛЯЕТ ИСПРАВИТЬ ОШИБКУ,"
1016  PRINT "ДОПУЩЕННУЮ НА ПРЕДЫДУЩЕМ ШАГЕ, А U=-2"
1018  PRINT "ОЗНАЧАЕТ ОКОНЧАНИЕ ВВОДА."
1020  LET N3=0
1022  PRINT "ШАГ N";N3+1," U=";
1024  INPUT U
1026  IF U<0 THEN 1034
1028  LET N3=N3+1
1030  LET U[N3]=U
1032  GOTO 1022
1034  IF U=-2 THEN 1040
1036  LET N3=N3-1+SGN(1-SGN(N3))
1038  GOTO 1022
1040  PRINT "ЧИСЛО ВВЕДЕННЫХ УЗЛОВ РАВНО ";N3
1042  IF N3>1 THEN 1048
1044  PRINT "ОШИБКА: ЧИСЛО УЗЛОВ ДОЛЖНО БЫТЬ >1."
1046  GOTO 1010
1048  IF N9=2 THEN 1056
1050  PRINT "УКАЖИТЕ ГРАНИЦЫ ЧАСТОТЫ И ШАГ ПО ЧАСТОТЕ (В ГЦ)."
1052  INPUT F1,F2,F3
1054  LET F=F1
1056  GOSUB 1500
1058  IF N9=2 THEN 1062
1060  PRINT "F(ГЦ)=";F
1062  IF N5>1 THEN 1068
1064  PRINT "RE(Z)=";Y1,"IM(Z)=";Y2
1066  GOTO 1086
1068  PRINT "N1.N2","RE(Z)","IM(Z)"
1070  PRINT "--------------------"
1072  FOR I=1 TO N5
1074  LET Z=0
1076  IF N9=2 THEN 1080
1078  LET Z=Z[I,2]
1080  PRINT Z[I,N9],Z[I,1],Z
```

```
1082  NEXT I
1084  PRINT "--------------------"
1086  IF N9=2 THEN 1102
1088  LET F=F+F3
1090  IF F <= F2 THEN 1056
1092  PRINT "РАСЧЕТ ЗАКОНЧЕН."
1094  PRINT "НУЖНО ЛИ ЕГО ПОВТОРИТЬ ДЛЯ ДРУГОГО"
1096  PRINT "ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ (1-ДА,0-НЕТ) ?"
1098  INPUT Z
1100  IF Z=1 THEN 1050
1102  STOP
9999  END
1490  REM ***********************************
1492  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ RE(Z) И IM(Z) ВЕТВЕЙ *
1494  REM * МНОГОПОЛЮСНИКА ПРИ ЧАСТОТЕ F.   *
1496  REM ***********************************
1500  DEF FNA(A)=INT(ABS(A))
1502  DEF FNB(B)=INT((ABS(B)-FNA(B))*NO+.5)
1504  IF N9=3 THEN 1510
1506  LET F=0
1508  LET F1=0
1510  IF F>F1 THEN 1518
1512  PRINT "УКАЖИТЕ ЧИСЛО СТРОК МАССИВА Z."
1514  INPUT N8
1516  LET ZO=N9-1
1518  LET N2=N2+1
1520  FOR N=1 TO N2
1522  LET N[N]=0
1524  NEXT N
1526  FOR N=1 TO N3
1528  LET N[U[N]+1]=2
1530  NEXT N
1532  LET W=2*3.14159*F
1534  FOR N=1 TO N1
1536  LET P=P[N,1]
1538  LET N5=FNA(P)+1
1540  LET N6=FNB(P)+1
1542  LET N[N5]=N[N5]+1/NO
1544  LET N[N6]=N[N6]+1/NO
1546  LET Z[N,1]=P[N,2]
1548  IF N9=2 THEN 1556
```

```
1550  LET Z[N,2]=P[N,3]*W
1552  IF P[N,4]=0 THEN 1556
1554  LET Z[N,2]=Z[N,2]-1/W/P[N,4]
1556  LET Z[N,N9]=P[N,1]
1558  IF N5<N6 THEN 1562
1560  LET Z[N,N9]=N6-1+(N5-1)/NO
1562  NEXT N
1564  LET N5=N1
1566  LET N6=N2
1568  LET N7=0
1570  LET N4=0
1572  GOTO 1622
1574  LET K8=Z[K9+1,N9]-Z[K9,N9]
1576  IF K8>0 THEN 1622
1578  IF K8<0 THEN 1606
1580  LET Z1=K9
1582  LET Z2=Z1+1
1584  LET Z3=Z1
1586  LET Z4=N8
1588  GOSUB 4050
1590  LET Z=Z[K9,N9]
1592  LET K6=FNA(Z)+1
1594  LET K7=FNB(Z)+1
1596  GOSUB 1710
1598  LET Z[Z2,N9]=N2+N7
1600  LET N7=N7+1
1602  LET N4=K9
1604  GOTO 1624
1606  FOR N=1 TO N9
1608  LET Z=Z[K9,N]
1610  LET Z[K9,N]=Z[K9+1,N]
1612  LET Z[K9+1,N]=Z
1614  NEXT N
1616  IF K9=1 THEN 1622
1618  LET K9=K9-1
1620  GOTO 1574
1622  LET N4=N4+1
1624  LET K9=N4
1626  IF N4<N5 THEN 1574
1628  IF Z[N5,N9]<N2 THEN 1634
1630  LET N5=N5-1
```

```
1632  GOTO 1628
1634  IF N6=N3 THEN 1696
1636  LET N7=0
1638  LET N4=0
1640  LET K8=1
1642  IF N[K8]>1 THEN 1672
1644  LET K9=FNB(N[K8])
1646  IF K9<2 THEN 1672
1648  IF K9>2 THEN 1666
1650  GOSUB 1724
1652  LET Z1=K[1]
1654  LET Z2=K[2]
1656  LET Z3=Z1
1658  GOSUB 4040
1660  LET Z[Z2,N9]=(N2+N7)*(1+1/NO)
1662  LET N7=N7+1
1664  GOTO 1638
1666  IF N4=0 THEN 1670
1668  IF FNB(N[N4]) <= K9 THEN 1672
1670  LET N4=K8
1672  LET K8=K8+1
1674  IF K8 <= N2 THEN 1642
1676  IF N4*(1-SGN(N7))=0 THEN 1570
1678  LET K8=N4
1680  GOSUB 1724
1682  LET Z1=2
1684  LET Z2=K5
1686  LET Z3=N5
1688  LET Z4=N8
1690  GOSUB 4060
1692  LET N5=Z3
1694  GOTO 1570
1696  IF N5>1 THEN 1706
1698  LET Y1=Z[N5,1]
1700  LET Y2=0
1702  IF N9=2 THEN 1706
1704  LET Y2=Z[N5,2]
1706  LET N2=N2-1
1708  RETURN
1710  IF N[K6]>1 THEN 1716
1712  LET N[K6]=N[K6]-1/NO
```

```
1714  LET N6=N6-1+SGN(FNB(N[K6]))
1716  IF N[K7]>1 THEN 1722
1718  LET N[K7]=N[K7]-1/NO
1720  LET N6=N6-1+SGN(FNB(N[K7]))
1722  RETURN
1724  LET K5=FNB(N[K8])
1726  LET K4=K8-1
1728  LET K3=0
1730  LET K2=1
1732  LET K1=Z[K2,N9]
1734  IF (FNA(K1)-K4)*(FNB(K1)-K4)#0 THEN 1750
1736  LET K3=K3+1
1738  LET K[K3]=K2
1740  LET K=FNA(K1)
1742  IF K#K4 THEN 1746
1744  LET K=FNB(K1)
1746  IF N[K+1]>1 THEN 1750
1748  LET N[K+1]=N[K+1]+(K5-2)/NO
1750  LET K2=K2+1
1752  IF K3<K5 THEN 1732
1754  LET N[K8]=0
1756  LET N6=N6-1
1758  RETURN
```

Описание всех массивов должно быть включено пользователем в текст программы до начала ее работы в том случае, если приведенное в строке 1000 определение размерностей окажется недостаточным.

Используемый алгоритм не позволяет в данной программе однозначно оценить связь топологической сложности анализируемой схемы с размерностью необходимых при вычислениях массивов. В общем случае можно рекомендовать следующие размерности: при расчете на постоянном токе

```
1000 DIM P(M1,2), Z(M2,2), N(M1), U(M3)
```

а при переменном токе так:

```
1000 DIM P(M1,4), Z(M2,3), N(M1), U(M3)
```

В этих строках вместо M1, M2, M3 можно подставить численные значения: M1 – число ветвей схемы, M2 = 2M1, M3 – число узлов схемы.

Проверить работоспособность программы можно по методике, изложенной в § 3.4.

▼ Программа ПРЭС4 обеспечивает полностью автоматизированный расчет на постоянном и переменном токах электрических цепей произволь-

ной топологии. Ее целесообразно усовершенствовать с учетом специфики вычислений. Так, отметим, что автоматический выбор последовательности эквивалентных преобразований требует значительных затрат времени (особенно для сложных схем с большим числом ветвей). Поэтому при многовариантном расчете одной и той же цепи целесообразно дополнить алгоритм следующими процедурами:

1) при первом расчете цепи запомнить всю найденную последовательность преобразований (разместить в оперативной памяти или на машинных носителях);

2) при последующих расчетах использовать эту последовательность в качестве готового алгоритма свертывания, организовав с этой целью считывание ее из памяти или с диска.

Большие возможности открываются и при использовании средств машинной графики, однако на них мы останавливаться не будем.

В заключение отметим, что для организации практических работ по анализу электрических цепей желательно иметь в библиотеке обе программы – и ПРЭС3, и ПРЭС4. Необходимость первой кажется не столь очевидной, так как ПРЭС4 обеспечивает более высокий уровень автоматизации вычислений. Однако практика проведения электрических расчетов показывает, что работа инженера-электрика содержит значительное число стадий, которые носят эвристический характер. В таких ситуациях более пригодными являются программы типа ПРЭС3, позволяющие корректировать процесс вычислений и менять направление их выполнения.

3.4. Методы тестирования

▼ В данном параграфе описаны методы тестирования программ расчета по методу редукции.

В настоящее время теория верификации программ (назначение которой – создание методов доказательства их правильности) не дает общих методов обоснования верности программ [36]. Одним из способов анализа работоспособности и повышения надежности математического обеспечения является так называемое многовариантное, или, в частном случае, дуальное, программирование. Оно состоит в том, что создаются два или более независимо написанных вариантов программы [37], в автоматическом режиме производится сравнение вырабатываемых ими выходных данных и принимается соответствующее решение. Аналогом такого подхода было применявшееся в гл. 2 сопоставление результатов расчета цепей одной и той же конфигурации с использованием программ для методов КТ и УП. (Пользователь может продолжить этот путь – включить, если позволяют объем оперативной памяти ПЭВМ, процедуру автоматического сравнения результатов двух программ с соответствующей диагностикой.)

Имея две программы (например, ПРЭС0 и ПРЭС1), возможно проверить вторую (как более сложную), рассчитав с ее помощью топологи-

чески эквивалентную цепь на постоянном токе. Результаты таких расчетов должны совпадать в пределах точности вычислений для данной ЭВМ. А несовпадение результатов будет свидетельствовать о необходимости дальнейшей отладки.

Применим описанный метод к программе ПРЭС1. Возьмем в качестве исходных данных R_1 = 6 Ом, R_2 = 2 Ом, R_3 = 1 Ом, R_4 = 5 Ом, R_5 = 4 Ом, а $L_k = C_k = 0$ (рис. 3.1, *а*), заменим строки 1020–1060 на одну

```
1020 DATA 6,0,0,2,0,0,1,0,0,5,0,0,4,0,0
```

Проводя вычисления, отмечаем совпадение с результатом, полученным с помощью ПРЭС0.

▼ Перейдем ко второму способу тестирования. Он, как омечалось ранее в § 2.4, состоит в том, что при подготовке исходных данных значения частоты и параметров ветвей выбираются так, чтобы для каждой k-й ветви выполнялось соотношение

$$\mathrm{Re}(Z_k) = \mathrm{Im}(Z_k). \qquad (3.2)$$

Комплексное сопротивление ветви (если обозначить мнимую и действительную части как A_k) равно $A_k(1+j)$.

В этом случае тестовый расчет существенно упрощается. Так, например, эквивалентное сопротивление двух последовательно соединенных ветвей $Z = (A_1 + A_2)(1 + j)$, а параллельно соединенных ветвей

$$Z = \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2}(1 + j).$$

Можно показать, что и в случае преобразования треугольник – звезда и многолучевая звезда – многоугольник вычисления производятся над коэффициентами A_k, а результат затем получается умножением на комплексное число $1 + j$.

Алгоритм редукции есть последовательность перечисленных эквивалентных преобразований. Поэтому, если известен результат расчета цепи на постоянном токе (обозначим его $R_э$), то нетрудно предсказать результат расчета на переменном токе

$$Z_э = R_э(1 + j)$$

при условии, что элементы каждой ветви удовлетворяют (3.2). А последнее связывает четыре параметра: круговую частоту ω, активное сопротивление ветви R_k, индуктивность L_k и емкость C_k:

$$R_k = \omega L_k - 1/(\omega C_k). \qquad (3.3)$$

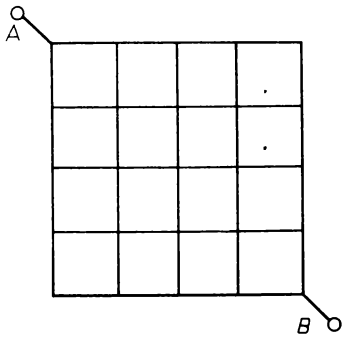


Рис. 3.2. Тестовая схема в форме квадратной решетки

Три из них могут быть выбраны произвольно. Положим $C_к = 0$, круговую частоту $\omega = 1$ (т. е. $f = 1/(2\pi) = 0{,}159155$ Гц), и тогда $R_к = L_к$. Таким образом, достаточно выбрать только значение сопротивления, чтобы по нему найти все остальные параметры ветви.

С целью проверить ПРЭС1 принимаем $R_1 = 6$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 1$ Ом, $R_4 = 5$ Ом, $R_5 = 4$ Ом.

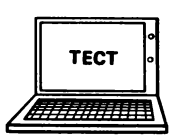
Расчет при этих данных дает $\mathrm{Re}(Z_э) = 3{,}79775$ Ом и $\mathrm{Im}(Z_э) = 3{,}79775$ Ом.

Если результаты тестирования оказались отрицательными, то следующий шаг – локализация ошибки. Для этого достаточно включить печать (вывод на экран) промежуточных результатов после каждой процедуры эквивалентных преобразований и определить тот этап расчета, после которого впервые возникает неравенство действительной и мнимой частей комплексного сопротивления – признак ошибки на этом этапе.

При тестировании программы ПРЭС3 целесообразно производить многократный счет для одной и той же схемы, вводя каждый раз иную последовательность этапов свертывания, а затем сравнить полученные результаты. При тестировании ПРЭС4 желательно ту же схему просчитать и с помощью ПРЭС3.

▼ Проверить правильность работы программ можно, проведя расчеты для схемы, эквивалентное сопротивление которой можно заранее подсчитать. В качестве такой рекомендуем использовать квадратную планарную решетку (рис. 3.2), все ветви которой имеют одинаковые активные и реактивные сопротивления. Эквивалентное сопротивление определяется относительно точек A и B на диагонали.

Исходные данные для такой тестовой схемы ввиду их большого количества лучше подготовить с помощью небольшой подпрограммы "ТЕСТ".




```
1994  REM ***************************
1996  REM * ТЕСТ (РЕШЕТЧАТАЯ СХЕМА) *
1998  REM ***************************
2000  PRINT "ВВЕДИТЕ ЧИСЛО УЗЛОВ РЕШЕТКИ"
2002  PRINT "КВАДРАТНОЙ ФОРМЫ, РАСПОЛОЖЕННЫХ"
2004  PRINT "ВДОЛЬ ОДНОГО ИЗ ОСНОВАНИЙ "
2006  PRINT "КВАДРАТА."
```

```
2008  INPUT N2
2010  LET NO=1000
2012  PRINT "ЗАДАЙТЕ ЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ"
2014  PRINT "R,L,C ОДНОЙ ИЗ ВЕТВЕЙ РЕШЕТКИ."
2016  INPUT R,L,C
2018  LET N9=2+SGN(ABS(L)+ABS(C))
2020  LET N=0
2022  FOR K1=1 TO N2
2024  FOR K2=1 TO N2
2026  LET K3=(K1-1)*N2+K2-1
2028  LET K4=K3+1
2030  IF K2=N2 THEN 2034
2032  GOSUB 2050
2034  IF K1=N2 THEN 2040
2036  LET K4=K3+N2
2038  GOSUB 2050
2040  NEXT K2
2042  NEXT K1
2044  LET N1=N
2046  LET N2=N2*N2-1
2048  RETURN
2050  LET N=N+1
2052  LET P[N,1]=K3+K4/NO
2054  LET P[N,2]=R
2056  IF N9=2 THEN 2062
2058  LET P[N,3]=L
2060  LET P[N,4]=C
2062  RETURN
```

Ее следует присоединить к ГП вместо ПП 2000, описанной в гл. 1. Обращение к ней также производится строкой GOSUB 2000. Программа "ТЕСТ" запрашивает размер стороны решетки (т.е. число узлов на одной стороне), а затем вводит R, L, C одной ветви. После этого заполняется матрица P, в которой и хранятся все исходные данные. В ней же содержится указание, что свертывание производится относительно точек A и B, расположенных на диагонали (см. рис. 3.2). Сопротивление решетки равно $Z_N = K_N Z$, где Z – сопротивление (активное или комплексное) одной ветви решетки, коэффициент K_N = 1; 1,5; 1,8571; 2,1470 при $N = 1, 2, 3, 4$ (N – число ветвей в стороне квадрата).

Описанная тестовая электрическая цепь может рассматриваться как верхняя граница топологической сложности электрических цепей с близким числом ветвей, так как у нее средняя степень вершины быстро

приближается с ростом размерности к 4, что заведомо больше средней степени вершины графов, которые встречаются в практических расчетах (2,5–3).

Результаты расчетов целесообразно также контролировать различными приближенными методами, в том числе с помощью методик, описанных в [38–39].

3.5. Частотные характеристики

Описанные в предыдущих параграфах программы позволяют решить ряд задач частотного анализа электрических цепей.

Если имеется программа для расчета эквивалентного сопротивления цепи, то для проведения частотного анализа достаточно к ней добавить: а) цикл по частоте; б) ввод начальной и конечной частоты, шага по частоте; в) вывод результатов в виде таблиц и графиков; г) некоторые ПП, например определения модуля и угла комплексного числа.

В программе ПРЭС4 предусмотрена возможность организации цикла по частоте, а ввод данных с помощью ПП 2000 перенесен в ГП. Если в этой программе, а также в ПРЭС3 предусмотреть запоминание порядка эквивалентных преобразований, то это позволит сократить время расчетов.

Однако целесообразно иметь универсальную программу, предназначенную для расчета частотных характеристик. Текст такой программы с названием ПРЭС5 приведен ниже.

```
490  REM ******************************
492  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ АФЧХ. ПРЭС5.   *
494  REM * ПЕЧАТЬ ГРАФИКОВ И ТАБЛИЦ. *
496  REM * ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСОВ.   *
498  REM ******************************
500  DIM X[40,4],Y[4,2],K[60],U[2]
502  REM--------
504  REM НАСТРОЙКА ПРОГРАММЫ
506  REM--------
510  PRINT "ПРОГРАММА НАСТРОЕНА (1-ДА,0-НЕТ) ?"
512  INPUT X
514  IF X=1 THEN 544
516  PRINT "1. ЗАГРУЗИТЕ ПП 6550, 7210, 7510 И 2000."
518  PRINT "2. ВВЕДИТЕ ПОД НОМЕРАМИ 6571 И 6597"
520  PRINT "   ОПЕРАТОР ' <N> GOSUB 950 ',"
522  PRINT "3. ВВЕДИТЕ ПОД НОМЕРАМИ 7215, 7223 И"
524  PRINT "   7259 ОПРАТОР '<N> LET M9=X(M8,M7)' ."
```

```
526  PRINT "4. ПОДГОТОВЬТЕ ПП 1500, В КОТОРОЙ ВЫЧИСЛЯЕТСЯ"
528  PRINT "   КОМПЛЕКСНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВУХПОЛЮСНИКА"
530  PRINT "   ПРИ ЧАСТОТЕ F (ГЦ). РЕЗУЛЬТАТЫ НУЖНО"
532  PRINT "   РАЗМЕЩАТЬ В Y1 (RE(Z)) И Y2 (IM(Z))."
534  PRINT "   ПРЕОБРАЗОВЫВАТЬ СХЕМУ СЛЕДУЕТ ОТНОСИТЕЛЬНО"
536  PRINT "   УЗЛОВ U(1) И U(2)."
538  PRINT "ПОСЛЕ ВЫПОЛНЕНИЯ УКАЗАННЫХ ПРОЦЕДУР ЗАПУСТИТЕ"
540  PRINT "ПРОГРАММУ ДИРЕКТИВОЙ ' RUN ' ."
542  STOP
544  REM--------
546  REM ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
548  REM--------
550  PRINT "УКАЖИТЕ ЧИСЛО СТРОК МАССИВА X, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО"
552  PRINT "ДЛЯ ХРАНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ."
554  INPUT X1
556  GOSUB 2000
558  PRINT "УКАЖИТЕ ВЕРШИНЫ ДВУХПОЛЮСНИКА."
560  INPUT U[1],U[2]
562  LET N3=2
564  PRINT "УКАЖИТЕ ГРАНИЦЫ ЧАСТОТЫ И ШАГ ПО ЧАСТОТЕ (В ГЦ)."
566  INPUT F1,F2,F3
568  LET X2=(F2-F1)/F2
570  IF X1 >= X2 THEN 584
572  PRINT "В МАССИВЕ X НЕЛЬЗЯ РАЗМЕСТИТЬ СТОЛЬКО"
574  PRINT "ЗНАЧЕНИЙ АФЧХ. ПОВТОРИТЕ ВВОД."
576  GOTO 566
578  REM--------
580  REM ВЫЧИСЛЕНИЕ АФЧХ
582  REM--------
584  LET X2=0
586  LET X3=180/3.14159
588  FOR F=F1 TO F2 STEP F3
590  GOSUB 1500
592  LET X2=X2+1
594  LET X[X2,1]=Y1
596  LET X[X2,2]=Y2
598  LET X[X2,3]=SQR(Y1*Y1+Y2*Y2)
600  LET X[X2,4]=ATN(Y2/Y1)*X3
602  NEXT F
604  LET X0=-1
606  PRINT "РАСЧЕТ ЗАКОНЧЕН."
```

```
608  REM--------
610  REM ВЫБОР ПРОЦЕДУРЫ
612  REM--------
614  PRINT "УКАЖИТЕ ВИД РАБОТЫ: 1-ПЕЧАТЬ ТАБЛИЦЫ,"
616  PRINT "2-ПЕЧАТЬ ГРАФИКОВ, 3-ПОИСК РЕЗОНАНСОВ,"
618  PRINT "0-ВВОД НОВЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ИЛИ"
620  PRINT "ЗАВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ."
622  INPUT X4
624  IF X4=0 THEN 786
626  IF X4=1 THEN 642
628  IF X4=2 THEN 682
630  IF X4=3 THEN 736
632  PRINT "НЕВЕРНО УКАЗАН КОД. ПОВТОРИТЕ ВВОД."
634  GOTO 622
636  REM--------
638  REM ПЕЧАТЬ ТАБЛИЦЫ
640  REM--------
642  PRINT "ВВЕДИТЕ НОМЕР ТАБЛИЦЫ:"
644  PRINT "1. ПЕЧАТЬ RE(Z),IM(Z),MOD(Z),ARG(Z),"
646  PRINT "2. ПЕЧАТЬ RE(Y),IM(Y),MOD(Y),ARG(Y)."
648  INPUT X5
650  GOSUB 900
652  PRINT "ОБРАЗЕЦ ПЕЧАТИ:"
654  PRINT "F (ГЦ)"
656  PRINT "RE(...)","IM(...)","MOD(...)","ARG(...)"
658  PRINT "--------"
660  LET F=F1
662  FOR X7=1 TO X2
664  PRINT F
666  PRINT X[X7,1],X[X7,2],X[X7,3],X[X7,4]
668  LET F=F+F3
670  PRINT "--------"
672  NEXT X7
674  GOTO 614
676  REM--------
678  REM ПЕЧАТЬ ГРАФИКА
680  REM--------
682  PRINT "ВВЕДИТЕ НОМЕР ЗАВИСИМОСТИ:"
684  PRINT "1.RE(Z), 2.IM(Z), 3.MOD(Z), 4.ARG(Z), 5.Z=Z(F),"
686  PRINT "6.RE(Y), 7.IM(Y), 8.MOD(Y), 9.ARG(Y), 10. Y=Y(F)."
688  INPUT X5
```

```
690  GOSUB 900
692  IF X5=5*INT(X5/5) THEN 712
694  LET M0=X5-5*SGN(1+SGN(X5-6))
696  LET M1=1
698  LET M2=X2
700  LET M3=1
702  LET M4=7
704  LET M5=15
706  LET M6=30
708  GOSUB 7210
710  GOTO 614
712  LET K1=X2
714  LET K2=41
716  LET K3=27
718  LET K4=1
720  GOSUB 7510
722  FOR X=1 TO X2
724  LET X[X,3]=SQR(X[X,1]*X[X,1]+X[X,2]*X[X,2])
726  NEXT X
728  GOTO 614
730  REM--------
732  REM ПОИСК РЕЗОНАНСОВ
734  REM--------
736  PRINT "УКАЖИТЕ ВИД РЕЗОНАНСОВ:"
738  PRINT "1.РЕЗОНАНСЫ НАПРЯЖЕНИЙ, 2.РЕЗОНАНСЫ ТОКОВ."
740  INPUT X5
742  GOSUB 900
744  PRINT "ЗАДАЙТЕ ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ "
746  PRINT "РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ FO В ГЦ."
748  INPUT YO
750  LET F=F1
752  LET X8=SGN(X[2,3]-X[1,3])
754  FOR X7=2 TO X2-1
756  LET X9=SGN(X[X7+1,3]-X[X7,3])
758  IF X8 >= X9 THEN 772
760  LET Y[1,1]=F
762  LET Y[2,1]=F+F3
764  LET Y[1,2]=X[X7-1,3]
766  LET Y[2,2]=X[X7+1,3]
768  GOSUB 6554
770  PRINT "FO =";Y1
```

```
772  LET X8=X9
774  LET F=F+F3
776  NEXT X7
778  GOTO 614
780  REM--------
782  REM ИЗМЕНЕНИЕ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ
784  REM--------
786  PRINT "ВВЕДИТЕ НОМЕР ЗАДАНИЯ:"
788  PRINT "1. ИЗМЕНЕНИЕ СХЕМЫ,"
790  PRINT "2. ВВОД НОВЫХ ВЕРШИН ДВУХПОЛЮСНИКА,"
792  PRINT "3. ЗАДАНИЕ НОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ,"
794  PRINT "0. ЗАВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ."
796  INPUT X
798  IF X=1 THEN 556
800  IF X=2 THEN 558
802  IF X=3 THEN 564
804  IF X=0 THEN 9999
806  PRINT "НЕВЕРНО УКАЗАН НОМЕР. ПОВТОРИТЕ ВВОД."
808  GOTO 796
890  REM *********************
892  REM * ПЕРЕХОД ОТ Z К Y *
894  REM *********************
900  LET X6=X5-1.5
902  LET X6=SGN(X6-4*(1-SGN(ABS(X4-2))))
904  LET X7=X0*X6
906  IF X7>0 THEN 924
908  FOR X=1 TO X2
910  LET X7=X[X,1]*X[X,1]+X[X,2]*X[X,2]
912  LET X[X,1]=X[X,1]/X7
914  LET X[X,2]=-X[X,2]/X7
916  LET X[X,3]=SQR(X[X,1]*X[X,1]+X[X,2]*X[X,2])
918  LET X[X,4]=ATN(X[X,2]/X[X,1])*X3
920  NEXT X
922  LET X0=-X0
924  RETURN
940  REM ***************************
942  REM * ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ПП,    *
944  REM * ВЫЗЫВАЕМАЯ ИЗ ПП 6510. *
946  REM ***************************
950  LET F=Y1
952  GOSUB 1500
```

```
954  LET Y2=SQR(Y1*Y1+Y2*Y2)
956  RETURN
1490  REM *******************************
1492  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ RE(Z) И IM(Z)    *
1494  REM * ДВУХПОЛЮСНИКА ПРИ ЧАСТОТЕ F *
1496  REM *******************************
1500  LET W=2*3.14159*F
1502  LET Y1=R
1504  LET Y2=W*L
1506  IF C=0 THEN 1510
1508  LET Y2=Y2-1/W/C
1510  RETURN
1990  REM *************************
1992  REM * ВВОД ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ *
1994  REM *************************
2000  DATA 1,1.00000E-02,1.00000E-02
2002  READ R,L,C
2004  RESTORE
2006  RETURN
```

Опишем ее особенности. Ввод исходных данных, кроме топологии и R, L, C (параметров ветвей), включает указание номеров двух узлов U(1) и U(2), которые выбраны в качестве полюсов (относительно них сворачивается схема). Вводится также интервал частот, в котором проводится частотный анализ, и шаг по частоте.

Расчет схемы производится в ПП 1500. В ней методом редукции вычисляются при некоторой частоте F действительная и мнимая части комплексного сопротивления, размещаемые в Y1 и Y2. Затем эти результаты пересылаются в массив X.

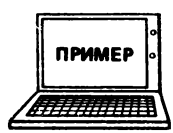
Ввод информации осуществляется или в виде таблиц, или в виде графиков. В первом случае на печать (или дисплей) выводится полная информация об эквивалентном сопротивлении или проводимости (действительная и мнимая компоненты, модуль и аргумент в градусах). Во втором случае можно напечатать график частотной зависимости одной из четырех перечисленных величин или вывести годограф, дающий картину изменения сопротивления $Z = Z(F)$ или проводимости $Y = Y(F)$ двухполюсника в зависимости от частоты на комплексной плоскости. В связи с тем что точки на годографе располагаются неравномерно (например, наблюдается сгущение точек в области низких и высоких частот), при вычислениях с целью получить графическую картину можно задавать несколько частотных интервалов с разными шагами по частоте.

Кроме того, программа позволяет определять резонансные частоты в заданном частотном интервале: находятся частоты резонансов по напряжению или по току (локальные минимумы модуля эквивалентного сопротивления или проводимости). Для этого используется метод золотого сечения (см. ПП6554, ПП7210, ПП7510 в гл. 5).

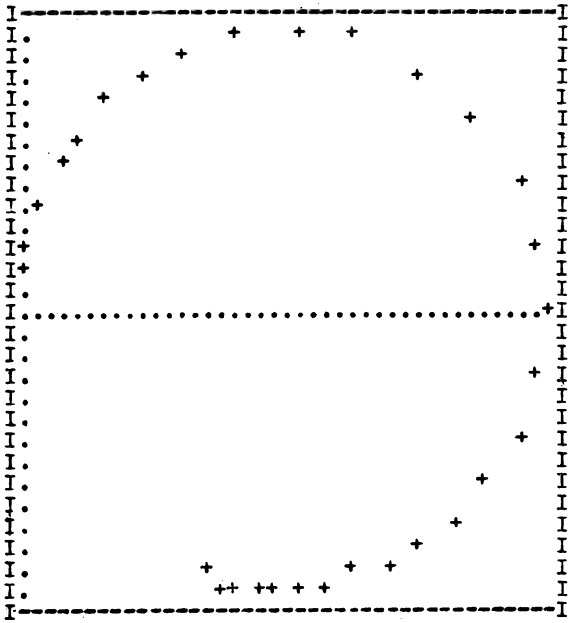
Последний применяется следующим образом. Перед вызовом ПП определяется интервал частот, в котором модуль комплексного сопротивления (или проводимости) достигает минимального значения. Границы интервала находятся с помощью пошагового перебора элементов массива X (где в третьем столбце записаны значения модуля).

Погрешность определения резонансной частоты вводится с клавиатуры после появления на дисплее соответствующего запроса. В большинстве практических применений достаточна погрешность 0,1 Гц. Повышение требований к точности приводит к значительному возрастанию времени счета, что особенно заметно при сложных схемах с большим числом ветвей.

В целях проверки работы программы ПРЭС5 рассмотрим простейший пример расчета для одной ветви с последовательно соединенными R, L, C элементами (R = 1 Ом, L = 0,01 Гн, C = 0,01 Ф). Сначала была найдена зависимость модуля и аргумента комплексного сопротивления от частоты в интервале от 1 до 30 Гц с шагом в 1 Гц, затем определена частота резонанса, равная 15,9128 Гц (точное значение – 15,9155 Гц). После этого выводился годограф комплексной проводимости в том же интервале частот. В данном случае точки годографа должны лежать на окружности с радиусом $R/2$ и координатами центра $(R/2, 0)$.




```
УКАЖИТЕ ВИД РАБОТЫ: 1-ПЕЧАТЬ ТАБЛИЦЫ,
2-ПЕЧАТЬ ГРАФИКОВ, 3-ПОИСК РЕЗОНАНСОВ,
0-ВВОД НОВЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ИЛИ
ЗАВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ.
?2
ВВЕДИТЕ НОМЕР ЗАВИСИМОСТИ:
1.RE(Z), 2.IM(Z), 3.MOD(Z), 4.ARG(Z), 5.Z=Z(F),
6.RE(Y), 7.IM(Y), 8.MOD(Y), 9.ARG(Y), 10. Y=Y(F).
?10
Y(MAX)= .499649          Y(MIN)=-.499887
X(MAX)= .999888          X(MIN)= 3.96342E-03
DY= 3.84437E-02          DX= 2.48981E-02
```



```
УКАЖИТЕ ВИД РАБОТЫ: 1-ПЕЧАТЬ ТАБЛИЦЫ,
2-ПЕЧАТЬ ГРАФИКОВ, 3-ПОИСК РЕЗОНАНСОВ,
0-ВВОД НОВЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ИЛИ
ЗАВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ.
?0

ВВЕДИТЕ НОМЕР ЗАДАНИЯ:
1. ИЗМЕНЕНИЕ СХЕМЫ,
2. ВВОД НОВЫХ ВЕРШИН ДВУХПОЛЮСНИКА,
3. ЗАДАНИЕ НОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ,
0. ЗАВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ.
?0

READY
```

Вообще особенность анализа поведения электрических цепей в частотной области состоит в том, что вычисления по программе производятся многократно (не один дясяток раз). Получив результаты расчета, пользователь анализирует их, выделяет наиболее интересные участки (диапазоны частот). Затем в выделенных областях расчет повторяется для той же схемы с иным шагом по частоте. И если требуется выделить или обнаружить какие-то специфические детали частотных характеристик, то расчеты многократно повторяются при разных шагах по частоте и в разных диапазонах. Кроме того, часто меняют один или несколько параметров ветвей, изменяют топологию схемы замещения (добавляя или уда-

ляя отдельные ветви, что, например, соответствует присоединению или отключению фильтров или компенсирующих конденсаторных батарей в электроэнергетических системах. Такая методика хорошо сочетается с диалоговым режимом вычислений на ПЭВМ, и именно на такой режим ориентированы описанные выше программы.

3.6. Длинные линии

▼ Цепи с распределенными параметрами – важный объект электротехнических расчетов. Например, при анализе стационарных режимов электроэнергетических систем необходимо определять параметры линий передач. В данном параграфе описаны ПП, нужные для подобных расчетов.

Предварительно приведем ПП для перехода от одной формы представления параметров, характеризующих линии, к другой.

▼ Вычисление параметров длинных линий основано на использовании операций с комплексными числами (арифметические операции, вычисление гиперболических функций комплексного переменного и др.). Эти ПП приведены в гл. 5 и используются при разработке описанных ниже программ.

Длинные линии характеризуются погонными или первичными параметрами R_0, L_0, G_0 и C_0 – удельным сопротивлением (Ом/км), удельной индуктивностью (Гн/км), удельной проводимостью (См/км) и удельной емкостью (Ф/км). Другой формой их представления являются вторичные или характеристические параметры: волновое сопротивление

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)/(G_0 + j\omega C_0)} \qquad (3.4)$$

и коэффициент распространения

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + J\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}. \qquad (3.5)$$

Формулы (3.4) и (3.5) позволяют переходить от первичных параметров длинной линии ко вторичным и реализованы в ПП 4600.

```
4590  REM ****************************************
4592  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ  *
4594  REM * ПО ЗАДАННЫМ ПЕРВИЧНЫМ ПАРАМЕТРАМ И     *
4596  REM * ЧАСТОТЕ.                               *
4598  REM ****************************************
4600  LET W=2*3.14159*F
4602  LET Z1=K[3]
4604  LET Z2=Z1+1
4606  LET Z[Z1,1]=Z[K[1],1]
4608  LET Z[Z1,2]=W*Z[K[1],2]
```

```
4610  LET Z[Z2,1]=Z[K[1]+1,1]
4612  LET Z[Z2,2]=W*Z[K[1]+1,2]
4614  LET Z3=K[2]
4616  GOSUB 4246
4618  LET Z3=Z3+1
4620  GOSUB 4226
4622  LET Z1=Z3
4624  GOSUB 4410
4626  LET Z1=Z1-1
4628  LET Z3=Z1
4630  GOSUB 4410
4632  RETURN
4640  REM ****************************************
4642  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ *
4644  REM * ПО ЗАДАННЫМ ВТОРИЧНЫМ ПАРАМЕТРАМ И    *
4646  REM * ЧАСТОТЕ .                            *
4648  REM ****************************************
4650  LET W=2*3.14159*F
4652  LET W1=1-SGN(ABS(W))+W
4654  LET Z1=K[1]+1
4656  LET Z2=K[1]
4658  LET Z3=K[2]
4660  GOSUB 4226
4662  LET Z[Z3,2]=Z[Z3,2]/W1
4664  LET Z3=Z3+1
4666  GOSUB 4246
4668  LET Z[Z3,2]=Z[Z3,2]/W1
4670  RETURN
4672  REM ****************************************
4674  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ХОЛОСТОГО ХОДА *
4676  REM * И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ЛИНИИ ПРИ       *
4678  REM * ИЗВЕСТНЫХ ВТОРИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ И      *
4680  REM * ДЛИНЕ ЛИНИИ .                        *
4682  REM ****************************************
4690  LET Z1=K[2]
4692  LET Z[Z1,1]=Z[K[1]+1,1]*D
4694  LET Z[Z1,2]=Z[K[1]+1,2]*D
4696  LET Z3=Z1+1
4698  LET Z2=K[3]
4700  LET Z4=Z2+1
4702  GOSUB 4510
```

```
4704  LET Z1=K[1]
4706  LET Z2=K[2]+1
4708  LET Z3=K[2]
4710  GOSUB 4246
4712  LET Z3=Z3+1
4714  GOSUB 4226
4716  RETURN
4718  REM ****************************************
4720  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ *
4722  REM * ПРИ ИЗВЕСТНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ СОПРОТИВЛЕНИЙ *
4724  REM * ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ. *
4726  REM * УКАЗЫВАЕТСЯ ТАКЖЕ ДЛИНА ЛИНИИ,       *
4728  REM * ЧАСТОТА И ОРИЕНТИРОВОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ   *
4730  REM * ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ .                   *
4732  REM ****************************************
4740  LET Z1=K[1]+1
4742  LET Z2=K[1]
4744  LET Z3=K[2]
4746  GOSUB 4226
4748  LET Z3=Z3+1
4750  GOSUB 4246
4752  LET Z1=Z3
4754  GOSUB 4410
4756  GOSUB 4530
4758  LET Z[Z3,1]=Z[Z3,1]/D
4760  LET P=3.14159
4762  LET K=INT(2*F*D/V-Z[Z3,2]/P+.5)
4764  LET Z[Z3,2]=(Z[Z3,2]+P*K)/D
4766  LET Z3=Z3-1
4768  LET Z1=Z3
4770  GOSUB 4410
4772  RETURN
```

До вызова ПП следует записать удельные параметры линии в двух произвольных смежных строках массива Z, причем R_0 и L_0 нужно разместить в первой из них (R_0 в первом столбце, L_0 во втором), а G_0 и C_0 — во второй строке. Кроме того, нужно занести в массив K номера строк исходных данных, вспомогательных строк и строк массива Z, в которых будут размещаться результаты вычислений:

K(1) — номер первой строки исходных данных в массиве Z;

K(2) — номер первой из двух строк результата;

K(3) — номер первой из двух вспомогательных строк.

Таблица 3.1

№ строки массива Z	Элемент массива Z	
	I столбца	II столбца
K(1)	R_0	L_0
K(1) + 1	G_0	C_0
...	...	...
K(2)	$\mathrm{Re}\{Z_в\}$	$\mathrm{Im}\{Z_в\}$
K(2) + 1	$\mathrm{Re}\{\gamma\}$	$\mathrm{Im}\{\gamma\}$
...	...	...
K(3)	Промежуточные результаты	
K(3) + 1	Промежуточные результаты	

Таблица 3.2

№ строки массива Z	Элемент массива Z	
	I столбца	II столбца
K(1)	$\mathrm{Re}\{Z_в\}$	$\mathrm{Im}\{Z_в\}$
K(1) + 1	$\mathrm{Re}\{\gamma\}$	$\mathrm{Im}\{\gamma\}$
...	...	...
K(2)	R_0	L_0
K(2) + 1	G_0	C_0

По окончании работы ПП в строке с номером K(2) будут размещены действительная и мнимая части волнового сопротивления (1-й столбец – действительная часть), а в строке K(2) + 1 – коэффициент распространения.

Информация в массиве Z будет размещаться так, как это показано в табл. 3.1.

В (3.4) и (3.5) входит круговая частота, поэтому перед вызовом ПП 4600 надо присвоить переменной F значение частоты в герцах.

Приведенный выше способ размещения информации является универсальным и используется во всех остальных описываемых в данном параграфе программах. Независимое размещение информации в разных строках массива Z обеспечивает большую гибкость программ.

Обратный переход от вторичных параметров к первичным можно осуществить, если основываться на уравнениях

$$R_0 + j\omega L_0 = Z_в\gamma; \quad G_0 + j\omega C_0 = \gamma/Z_в.$$

Для реализации этого перехода применяется ПП 4650. Перед ее вызовом следует произвести присвоения аналогично тому, как это описано выше для ПП 4600, однако в этом случае вспомогательные строки в массиве Z не используются.

Размещение информации в массиве Z должно соответствовать показанному в табл. 3.2.

Иногда длинная линия представляется комплексными сопротивлениями холостого хода и короткого замыкания

$$Z_х = Z_в\,\mathrm{cth}(\gamma x); \quad Z_к = Z_в\,\mathrm{th}(\gamma x),$$

где x – длина линии.

Вычислить эти параметры можно с помощью ПП 4690, для которой исходными данными служат $Z_в$ и γ, записанные в массиве Z так, как

Таблица 3.3

№ строки массива	Содержание элементов	
	I столбца	II столбца
K(1)	$\mathrm{Re}\{Z_в\}$	$\mathrm{Im}\{Z_в\}$
K(1) + 1	$\mathrm{Re}\{\gamma\}$	$\mathrm{Im}\{\gamma\}$
...	...	...
K(2)	$\mathrm{Re}\{Z_х\}$	$\mathrm{Im}\{Z_х\}$
K(2) + 1	$\mathrm{Re}\{Z_к\}$	$\mathrm{Im}\{Z_к\}$
...	...	...
K(3)	Промежуточные результаты	

Таблица 3.4

№ строки массива	Содержание элементов	
	I столбца	II столбца
K(1)	$\mathrm{Re}\{Z_х\}$	$\mathrm{Im}\{Z_х\}$
K(1) + 1	$\mathrm{Re}\{Z_к\}$	$\mathrm{Im}\{Z_к\}$
...	...	...
K(2)	$\mathrm{Re}\{Z_в\}$	$\mathrm{Im}\{Z_в\}$
K(2) + 1	$\mathrm{Re}\{\gamma\}$	$\mathrm{Im}\{\gamma\}$

это показано в табл. 3.3, а также длина линии в километрах, которая заносится в *D*.

Для решения обратной задачи – определения γ и $Z_в$ – недостаточно знать только $Z_х$ и $Z_к$, а также x. Помимо этого следует использовать значение частоты и ориентировочное значение фазовой скорости, что обусловлено неоднозначностью решения уравнений, в которые входят гиперболические функции комплексных переменных. Поэтому при применении ПП 4740 в качестве исходных данных должна фигурировать также фазовая скорость, которая присваивается переменной *V*.

Размещение информации для этого случая показано в табл. 3.4.

Все три вида описания длинных линий являются эквивалентными, и их выбор определяется лишь постановкой задачи расчета. Например, из опытов холостого хода и короткого замыкания можно получить $Z_х$ и $Z_к$, а затем рассчитать удельные параметры линии.

▼ В энергетике часто производят вычисления со схемами замещения для цепей, содержащих длинные линии, к которым присоединена нагрузка. В целях получения схемы замещения можно линию вместе с нагрузкой заменить эквивалентным сопротивлением по формуле

$$Z = Z_х \frac{Z_н + Z_к}{Z_н + Z_х},$$

где $Z_н$ – сопротивление нагрузки. Соответствующие вычисления реализуются с помощью ПП 4790.

```
4774 REM ******************************************
4776 REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ ВХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИНИИ *
4778 REM * ПРИ ЗАДАННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ ХОЛОСТОГО   *
4780 REM * ХОДА, КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И НАГРУЗКИ,   *
4782 REM * ПОДКЛЮЧЕННОЙ В КОНЦЕ ЛИНИИ .           *
```

```
4784  REM ******************************************
4790  LET Z1=K[3]
4792  LET Z2=Z1+1
4794  LET Z[Z1,1]=Z[K[1]+1,1]+Z[K[1]+2,1]
4796  LET Z[Z1,2]=Z[K[1]+1,2]+Z[K[1]+2,2]
4798  LET Z[Z2,1]=Z[K[1],1]+Z[K[1]+2,1]
4800  LET Z[Z2,2]=Z[K[1],2]+Z[K[1]+2,2]
4802  LET Z3=K[2]
4804  GOSUB 4246
4806  LET Z1=K[1]
4808  LET Z2=Z3
4810  GOSUB 4226
4812  RETURN
4814  REM ******************************************
4816  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ Т-ОБРАЗНОЙ  СХЕМЫ *
4818  REM * ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНИИ ПО ИЗВЕСТНЫМ ВТОРИЧНЫМ     *
4820  REM * ПАРАМЕТРАМ И ДЛИНЕ (·ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ       *
4822  REM * ФУНКЦИИ ) .                               *
4824  REM ******************************************
4830  LET KO=1
4832  LET Z1=K[2]
4834  LET Z[Z1,1]=Z[K[1]+1,1]*D
4836  LET Z[Z1,2]=Z[K[1]+1,2]*D
4838  LET Z2=Z1+1
4840  LET Z3=K[3]
4842  GOSUB 4470
4844  LET Z3=Z3+1
4846  GOSUB 4500
4848  LET Z[Z3,1]=Z[Z3,1]-1
4850  LET Z1=K[1]
4852  LET Z2=K[3]
4854  LET Z3=K[2]+2-KO
4856  IF KO=2 THEN 4862
4858  GOSUB 4246
4860  GOTO 4864
4862  GOSUB 4226
4864  LET Z1=Z3
4866  LET Z2=K[3]+1
4868  LET Z3=K[2]-1+KO
4870  IF KO=2 THEN 4876
4872  GOSUB 4226
```

```
4874  GOTO 4878
4876  GOSUB 4246
4878  RETURN
4880  REM ***********************************************
4882  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ П-ОБРАЗНОЙ СХЕМЫ *
4884  REM * ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНИИ ПО ИЗВЕСТНЫМ ВТОРИЧНЫМ    *
4886  REM * ПАРАМЕТРАМ И ДЛИНЕ ( ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ      *
4888  REM * ФУНКЦИИ ) .                               *
4890  REM ***********************************************
4900  LET KO=2
4902  GOSUB 4832
4904  RETURN
```

Здесь исходные данные записываются в массив Z в порядке, показанном в табл. 3.5.

Таблица 3.5

№ строки массива Z	Элемент массива Z	
	I столбец	II столбец
K(1)	$\mathrm{Re}\{Z_X\}$	$\mathrm{Im}\{Z_X\}$
K(1) + 1	$\mathrm{Re}\{Z_K\}$	$\mathrm{Im}\{Z_K\}$
K(1) + 2	$\mathrm{Re}\{Z_H\}$	$\mathrm{Im}\ Z_H$
...	...	...
K(2)	$\mathrm{Re}\{Z\}$	$\mathrm{Im}\{Z\}$
...	...	...
K(3)	Промежуточные результаты	
K(3) + 1	Промежуточные результаты	

Таблица 3.6

№ строки массива Z	Элемент массива Z	
	I столбец	II столбец
K(1)	$\mathrm{Re}\{Z_B\}$	$\mathrm{Im}\{Z_B\}$
K(1) + 1	$\mathrm{Re}\{\gamma\}$	$\mathrm{Im}\{\gamma\}$
...	...	...
K(2)	$\mathrm{Re}\{Z_1\}$	$\mathrm{Im}\{Z_1\}$
K(2) + 1	$\mathrm{Re}\{Z_2\}$	$\mathrm{Im}\{Z_2\}$
...	...	...
K(3)	Промежуточные результаты	
K(3) + 1	Промежуточные результаты	

Если линию необходимо представить Т- или П-образными схемами замещения, то следует воспользоваться ПП 4830 и ПП 4900.

Для Т-образной схемы замещения, изображенной на рис. 3.3, *а*,

$$Z_1 = Z_B(\mathrm{ch}(\gamma x) - 1)/\mathrm{sh}(\gamma x); \qquad (3.6)$$

$$Z_2 = Z_B/\mathrm{sh}(\gamma x), \qquad (3.7)$$

где γ, Z_B и x соответствуют приведенным выше обозначениям.

Вычисления по (3.6) и (3.7) реализуются подпрограммой ПП 4830. До ее вызова следует заполнить (как и раньше) некоторые строки массивов Z и K в соответствии с табл. 3.6.

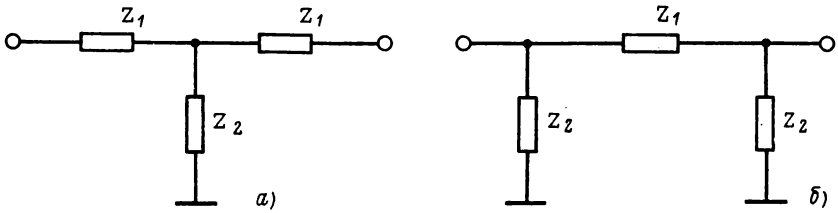


Рис. 3.3. Т- и П-образные схемы замещения длинных линий

Для П-образной схемы замещения, изображенной на рис. 3.3, *б*,

$$Z_1 = Z_B \mathrm{sh}(\gamma x); \quad Z_2 = Z_B \mathrm{sh}(\gamma x)/(\mathrm{ch}(\gamma x) - 1).$$

Для нее используется ПП 4900, обращение к которой требует подготовки массива Z аналогично тому, как это показано в табл. 3.6.

Пример использования описанных в данном параграфе подпрограмм приведен в приложении 1.

Глава четвертая

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА

4.1. Метод статистического моделирования

▼ В данной главе описывается применение программ на языке БЕЙСИК для реализации метода статистического моделирования (статистических испытаний или метод Монте-Карло). Вообще при моделировании на ПЭВМ, как отмечается в [40, 41], этот язык программирования широко используется, так как обеспечивает удобство работы пользователя, наглядное отображение получаемой информации, легкость изменения хода вычислений и структуры модели, сокращает время проведения расчетов.

Метод статистического моделирования (для краткости в дальнейшем будем называть его метод МК) применяется при исследовании объектов, в описании которых играет существенную роль статистическая вариация и которые включают в себя вероятностные процессы. Большинство электротехнических устройств, изделий, аппаратов и машин могут быть отнесены к этому классу. Так, например, свойства электротехнических материалов (сопротивление, индукция, электрическая прочность и другие физические величины, характеризующие их) имеют значительный статистический разброс [42, 45, 58]. Электрические аппараты и машины выпускаются в серийном производстве с большими колебаниями выходных параметров (таких, как тяговое усилие, время срабатывания, пусковой момент, ток холостого хода и др.). Электрические сети

и системы, как в целом, так и их отдельные элементы, также характеризуются значительными масштабами колебаний нагрузок, параметров, режимов работы, вероятностная природа которых уже давно привлекала внимание исследователей [43]. Причем чем более сложна, точна, чем более совершенна конструкция электротехнических изделий, чем в более сложных условиях они работают, чем выше требования к ним, тем нагляднее, явственнее проявляются случайные колебания их свойств. Все это обостряет внимание и интерес разработчиков, изготовителей и исследователей к особенностям формирования и учета влияния статистических закономерностей свойств, параметров и характеристик электротехнических изделий.

▼ Одним из средств анализа статистических явлений является метод МК. В данной главе он применяется для исследования статистической вариации характеристик электротехнических объектов на примере анализа разброса параметров электрических цепей, хотя область его применения, без сомнения, много шире.

Метод МК как прием анализа качества серийной продукции и расчета неоднородности ее свойств пока мало применяется в электротехнике в отличие, например, от электроники и радиоэлектроники, где статистический анализ схем активно используется при решении большого круга практических и теоретических задач и где этот анализ рассматривается как целое самостоятельное направление [44]. Поэтому приведем сначала краткое описание этого метода (его можно рассматривать лишь как введение в метод), а затем в последующих параграфах опишем программы для его реализации на языке БЕЙСИК.

Различия в свойствах "одинаково" изготовленных изделий проявляются в конечном итоге в производственном браке. По [45] среди малогабаритных трансформаторов из стали 3421 (Э340) брак достигает 3,5%, а импульсных трансформаторов – 9%. Значительно разнятся тяговые характеристики электромагнитных реле, изготовленных по одинаковой технологии. Разброс выходных характеристик электрических машин постоянного тока и маломощных асинхронных двигателей достигает 2–10% номинальных значений, значительны также колебания КПД для электродвигателей разного исполнения и назначения.

▼ Неоднородность выпускаемых партий изделий по техническим характеристикам, параметрам, показателям качества возникает в силу действия ряда причин. Во-первых, при изготовлении любых электротехнических изделий неизбежными являются колебания режимов технологического процесса. Во-вторых, в условиях массового производства неизбежны также колебания качества сырья, полуфабрикатов и комплектующих. Все это формирует значительный разброс свойств, неоднородность партий продукции по качеству (которые не всегда могут быть выявлены ограниченным выходным контролем). Неповторяемость, возникшая на стадии технологии, отражается не только в разбросе средних

значений параметров, но и в различном поведении изделий при эксплуатации. Даже если режимы эксплуатации изделий одинаковы, а сами изделия при выпуске заводом-изготовителем имеют одинаковые номиналы, тем не менее у них могут быть разные коэффициенты старения. А это приводит к тому, что партия однородных изделий со временем становится неоднородной, возникают различия в сопротивлении, емкости, токах холостого хода, времени срабатывания и т.п. В-третьих, сами условия эксплуатации крайне разнообразны, и по этой причине также создаются условия для неодинакового изменения технических характеристик и параметров, для отклонения их от номиналов.

Для того чтобы регламентировать определенный уровень некоторого свойства Y, в производстве устанавливают предельные допустимые отклонения для него – нижнюю Y_1 и верхнюю Y_2 границы. Они определяют ширину поля допуска $Y2 - Y1$ и его полуширину $\Delta Y = (Y_2 - Y_1)/2$, и требования к уровню Y задаются в виде $Y_{\text{ном}} \pm \Delta Y$, где $Y_{\text{ном}}$ – номинальное значение данного свойства. Если Y попадает в поле допуска, изделие признается годным, в противном случае оно бракуется. (Возможно много частных случаев, которые мы не рассматриваем.)

Для установления численных значений границ Y_1 и Y_2 в производственных условиях проводится достаточно большое число измерений, из полученного массива выбираются минимальное и максимальное значения, которые и назначаются в качестве границ допуска. Эта весьма упрощенная процедура может быть улучшена, если считать, что распределение Y близко к нормальному: тогда находится среднеквадратичное отклонение σ и принимают $\Delta Y = k\sigma$. Так, например, при $k = 2$ он равен 95,45%. Выбор k не может быть произвольным и, с одной стороны, нуждается в комплексном обосновании с учетом и технических, и экономических сторон вопросов. С другой стороны, сама процедура эмпирического определения допуска более сложна.

Однако чаще допуск требуется установить еще на стадии проектирования изделия. Один из методов основан на положениях теории вероятностей. Принимается, что свойство (выходное свойство) Y есть функция n независимых аргументов (факторов)

$$Y = f(X_1, \ldots, X_n), \tag{4.1}$$

каждый из которых в частном случае имеет нормальное распределение. Находят дисперсию

$$D(Y) = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \right)^2 D(X_i), \tag{4.2}$$

выраженную через дисперсии $D(X_i)$ аргументов и частные производные $\partial Y/\partial X_i$.

Затем определяется $D(Y)$ и выбирается коэффициент k. Так, например, в [45] рассматривалось в качестве выходного контролируемого параметра напряжение на вторичной обмотке малогабаритного трансформатора

$$U = 4{,}44f\,wBS, \tag{4.3}$$

где f – частота (она принимается постоянной, не подверженной случайным вариациям); w – число витков; B – индукция; S – поперечное сечение витого магнитопровода:

$$S = mhb, \tag{4.4}$$

здесь m – число витков магнитной ленты; b и h – толщина и ширина ленты.

Далее на основании экспериментально определенных значений дисперсии аргумента находится по (4.2) дисперсия U и устанавливается допуск.

▼ Изложенный аналитический метод расчета допуска (описанный во многих источниках – см., например, [44, 46]) применим при наложении определенных ограничений как на функцию (4.1), так и к форме кривых распределения независимых факторов, и эти условия далеко не всегда выполняются при проведении практических расчетов. В отличие от этого метод МК в приложении к данной задаче свободен от таких ограничений и позволяет проводить расчеты для произвольных функций (4.1) и произвольных видов распределения аргументов и, следовательно, охватить более широкий класс объектов.

Поясним его содержание на примере рассмотренного выше малогабаритного трансформатора. Подставим в (4.3) численное значение частоты (как и раньше, она может рассматриваться как постоянная величина) и случайные значения w, B и S, которые от изделия к изделию изменяются под воздействием многих неуправляемых и неучтенных причин. Вычисление по (4.3) дает первое значение U_1. Затем новое сочетание f, w, B, S подставляется в (4.3) и находится U_2. Расчет повторяется много раз (иногда 1000 и более), каждое его повторение имитирует процесс изготовления одного трансформатора, технологического процесса, где каждое изделие имеет свои, "индивидуальные" значения числа витков, индукции сердечника, толщины и ширины ленточного материала, из которого изготавливается витой магнитопровод. Эти величины (технологические факторы) независимы, они подвержены случайным колебаниям, и поэтому контролируемая результирующая величина – напряжение на вторичной обмотке, по которой оценивается качество изделия (разумеется, это не единственная характеристика качества трансформатора), – также подвержена случайным вариациям – наблюдается разброс U между U_{min} и U_{max}. А эти величины могут использоваться для оценки поля допуска.

Таким образом, в данном случае метод МК состоит в многократном повторении одинакового расчета – в вычислении по одной и той же

формуле (называемой моделью), но каждый раз набор аргументов принимается разным, берутся случайные их комбинации. (О том, как последнее осуществляется, рассказано в § 4.2 и 4.3.)

Этот метод является, как говорят, "чисто машинным" – он может быть реализован только на ЭВМ, так как при том огромном объеме вычислений, который требуется для его выполнения, расчеты вручную осуществить невозможно. Следующие параграфы поэтому посвящены описанию алгоритмов и программ на языке БЕЙСИК для вычислений по методу МК.

4.2. Программы для метода МК

▼ Имея программу расчета электрической цепи, можно задать вопрос: как изменяются токи в ветвях, напряжения в узлах или общее ее сопротивление при изменении одного из параметров элементов ветви, например, на 1, 5 или 10%. Например, для схемы рис. 2.1 выясним, как изменится ее общее сопротивление R при увеличении сопротивления отдельных резисторов R_i на 10%. Составим небольшую программу ПВЧ, использовав программу ПРЭС0 из гл. 3 в качестве подпрограммы для расчета этой схемы на постоянном токе. Будем изменять каждый раз на 10% только один параметр, тогда как сопротивления остальных резисторов будут иметь постоянные номинальные значения, задаваемые оператором DATA (см. строку 9000 программы ПВЧ).

```
100  REM ****************************************
102  REM * ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРИРАЩЕНИЯ           *
104  REM * СОПРОТИВЛЕНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ СХЕМЫ *
106  REM * НА ЭКВИВАЛЕНТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ.     *
108  REM * НАЗВАНИЕ: 'ПВЧ' .                   *
110  REM ****************************************
120  DIM R[5]
122  READ R[1],R[2],R[3],R[4],R[5]
124  GOSUB 1000
126  LET RO=R
128  PRINT "RO=";R
130  PRINT "ВВЕСТИ ПРИРАЩЕНИЕ АРГУМЕНТА (В %)"
132  INPUT N1
134  PRINT "N АРГ."," R","(R-RO)/RO*100"
136  LET N=5
138  FOR I=1 TO N
140  LET R1=R[I]
142  LET R[I]=R[I]*(1+N1/100)
144  GOSUB 1000
```

```
146  LET K=(R-RO)/RO*100
148  PRINT I,R,K
150  LET R[1]=R1
152  NEXT I
154  STOP
1000  REM ***************
1002  REM * ПП 'ПРЭСО' . *
1004  REM ***************
1010  LET R6=R[1]+R[3]+R[1]*R[3]/R[5]
1020  LET R7=R[3]+R[5]+R[3]*R[5]/R[1]
1030  LET R8=R[5]+R[1]+R[5]*R[1]/R[3]
1040  LET R9=R[2]*R6/(R[2]+R6)+R[4]*R7/(R[4]+R7)
1050  LET R=R8*R9/(R8+R9)
1060  RETURN
8900  REM --- ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ---
9000  DATA 6,2,1,5,4
9999  END
```

В результате расчетов по ПВЧ получаем коэффициенты чувствительности или коэффициенты влияния – относительное изменение в процентах (от его номинального значения) при увеличении каждого отдельно взятого сопротивления R_i. Это позволяет оценить влияние последних на R (табл. 4.1).

Таблица 4.1

№ аргумента I	ΔR, %	№ аргумента I	ΔR, %
1	1,16	4	2,79
2	2,66	5	2,82
3	0,16		

В общем случае с помощью ЭВМ можно анализировать, как "чувствует" изменение тех или иных величин объект в целом, т.е. насколько сильно влияет изменение аргумента на выходную величину [46, 47], причем изменения аргумента могут быть или детерминированными (как в приведенном выше случае), или случайными. Реализуем второй случай – напишем программу: для схемы рис. 2.1 вместо номинального значения R_3 = 1 Ом будет задавать случайные равномерно распределенные значения в интервале от 0,5 до 1,5 Ом. И каждый раз будем определять общее сопротивление цепи R.

▼ Такой расчет приведем с помощью программы ПМК0.

```
100  REM ******************************************
102  REM * ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ R3    *
104  REM * ПО РАВНОМЕРНОМУ ЗАКОНУ В ИНТЕРВАЛЕ .5-1.5 *
106  REM * НА ЭКВИВАЛЕНТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦЕПИ R.   *
108  REM * НАЗВАНИЕ: 'ПМКО' .                       *
110  REM ******************************************
120  DIM R[5]
122  READ R[1],R[2],R[3],R[4],R[5]
124  GOSUB 1000
126  LET RO=R
128  PRINT "RO=";RO
130  PRINT "ВВЕДИТЕ ЧИСЛО ИСПЫТАНИЙ (ОБ'ЕМ ВЫБОРКИ)."
132  INPUT N
134  FOR I=1 TO N
136  REM R3 ПОЛУЧАЕТ СЛУЧАЙНОЕ ПРИРАЩЕНИЕ
138  LET R[3]=.5+RND(1)
140  GOSUB 1000
142  LET P1=(R[3]-1)*100
144  LET P2=(R-RO)/RO*100
146  PRINT I;R[3];P1;"(%)";TAB(37);R;P2;"(%)"
148  NEXT I
150  STOP
900  REM ************************************
902  REM * ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ *
904  REM * МЕТОДОМ РЕДУКЦИИ. ПОСТОЯННЫЙ ТОК.  *
906  REM * НАЗВАНИЕ: "ПРЭСО" .                *
908  REM ************************************
1000  LET R6=R[1]+R[3]+R[1]*R[3]/R[5]
1010  LET R7=R[3]+R[5]+R[3]*R[5]/R[1]
1020  LET R8=R[5]+R[1]+R[5]*R[1]/R[3]
1030  LET R9=R[2]*R6/(R[2]+R6)+R[4]*R7/(R[4]+R7)
1040  LET R=R8*R9/(R8+R9)
1050  RETURN
8900  REM --- ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ---
9000  DATA 6,2,1,5,4
9999  END
```

В ней все факторы, т.е. сопротивления резисторов, кроме одного, – R_1, R_2, R_4 и R_5 – принимают значения, равные номиналам 6, 2, 5 и 4 Ом соответственно, тогда как R_3 благодаря строке 138 программы ПМКО, где используется датчик случайных чисел, изменяется случайным образом. И для каждого набора R (1) вычисляется общее сопротивле-

Таблица 4.2

№ п/п.	Случайные значения		ΔR, %
	R_3, Ом	R, Ом	
1	0,500015	3,76398	- 0,889
2	1,000009	3,79776	$1{,}38 \times 10^{-4}$
. . . . .			
199	1,04103	3,82051	0,599
200	1,003342	3,79796	$5{,}48 \times 10^{-4}$

ние R. Числа, вырабатываемые функцией БЕЙСИКа RND, как и любым программно реализованным датчиком случайных чисел (ДСЧ), следует, если быть точным, именовать псевдослучайными. Их совокупность можно рассматривать лишь как некоторую модель, с определенной степенью точности приближения имитирующую множество случайных чисел. В данной главе они называются случайными только для краткости. Более подробно о псевдослучайных числах, их генерации и свойствах см. в [48, 49].

Запустив программу ПМК0 на выполнение, получаем табл. 4.2, содержащую 200 случайных значений R.

Если просмотреть все 200 случайных значений R_3, то можно отметить, что R_3 колеблется в пределах 0,500015–1,489999 Ом, чему соответствует варьирование R в пределах –0,889 ÷ +0,721% номинала $R_{ном}$ = 3,79775 Ом, найденного при R_3 = 1 Ом.

По полученному массиву можно найти также дисперсию и другие статистические характеристики. Таким образом, если ПВЧ выявляет роль фактора при его детерминированном изменении, то ПМК0 позволяет оценить влияние случайных изменений отдельного фактора на повторяемость свойств изделия.

▼ Рассмотрим случай, когда не один, а все факторы имеют случайные колебания и моделируются программой ПМК1. В первой ее части вводятся пределы варьирования (нижняя и верхняя границы) для каждого резистора и объем выборки – число повторений расчета. Номинальные значения записаны в операторе DATA. Вторая часть (строки 150–158) циклически обращается к ПП 3000 и ПП 4000 и выводит результаты после каждого испытания (расчета, опыта). ПП 3000 при каждом обращении к ней присваивает пяти переменным случайные значения, подчиняющиеся равномерному закону. А последняя часть – это ПРЭС0, которая должна быть взята из гл. 3 и размещена в строках 1000–1020. Она реализует модель анализируемой цепи.

```
100  REM ***********************************************
102  REM * КОЛЕБАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕПИ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ *
104  REM * КОЛЕБАНИЯХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ВЕТВЯХ,          *
106  REM * РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПО РАВНОМЕРНОМУ ЗАКОНУ.      *
108  REM * НАЗВАНИЕ: 'ПМК1' .                          *
110  REM ***********************************************
120  DIM A[5],B[5],C[5],R[5]
122  REM M - ЧИСЛО АРГУМЕНТОВ
124  LET M=5
126  PRINT "УКАЖИТЕ ГРАНИЦЫ ИНТЕРВАЛОВ."
128  FOR J=1 TO M
130  PRINT "ДЛЯ АРГУМЕНТА N";J
132  INPUT A[J],B[J]
134  LET C[J]=B[J]-A[J]
136  NEXT J
138  PRINT "ВВЕДИТЕ ОБ'ЕМ ВЫБОРКИ."
140  INPUT N
142  READ R[1],R[2],R[3],R[4],R[5]
144  GOSUB 1000
146  LET RO=R
148  PRINT "RO=";RO
150  FOR I=1 TO N
152  GOSUB 3000
154  GOSUB 1000
156  PRINT I;R;(R-RO)/RO*100
158  NEXT I
160  STOP
1000  REM ****************
1002  REM * ПП 'ПРЭСО' . *
1004  REM ****************
1010  REM   .   .   .
1020  RETURN
2900  REM ***********************************************
2992  REM * ПРИСВОЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ЗНАЧЕНИЙ АРГУМЕНТАМ *
2994  REM ***********************************************
3000  FOR J=1 TO M
3002  LET R[J]=A[J]+C[J]*RND(1)
3004  NEXT J
3006  RETURN
8900  REM --- ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ---
9000  DATA 6,2,1,5,4
9999  END
```

При запуске программы пользователь вводит пределы варьирования для каждого фактора. Так, например, в протоколе расчета для всех переменных указаны колебания в пределах ±50% номинального значения.

```
                ПРОТОКОЛ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ ПМК1

УКАЖИТЕ ГРАНИЦЫ ИНТЕРВАЛА
ДЛЯ АРГУМЕНТА № 1  ? 3,9
ДЛЯ АРГУМЕНТА № 2  ? 1,3
ДЛЯ АРГУМЕНТА № 3  ? 0.5,1,5
ДЛЯ АРГУМЕНТА № 4  ? 2.5,7.5
ДЛЯ АРГУМЕНТА № 5  ? 2,7
ВВЕДИТЕ ОБЪЕМ ВЫБОРКИ
? 40
 Y0 = 3.79775
1          2.33698    -38.4642  %
2          4.23991     11.6425  %
...
39         3.46468    -8.77031  %
40         4.26486     12.2996  %
```

Программа ПМК1 по сравнению с ПМК0 более точно имитирует реальную ситуацию, с которой сталкиваются проектировщики и производственники, так как в ней предусмотрено одновременное случайное варьирование всех пяти независимых факторов. Однако в ней используется датчик случайных чисел, распределенных по равномерному закону. Следующим шагом приближения является использование ДСЧ с распределениями, встречающимися в практике. Об этом будет сказано в § 4.3.

Недостатком ПМК1 является то, что в практике применения статистических испытаний редко ставится задача — оценить только пределы варьирования функции отклика под действием случайных колебаний аргументов (факторов).

▼ Обычно задача ставится более широко — получить статистическое распределение функции и оценить ее параметры или иные вероятностные характеристики. Поэтому программа ПМК1 нуждается в дальнейшей

модификации. В частности, можно с ее помощью определять процент годных изделий $P_г$, определяемый по числу изделий, у которых выходной параметр попадает в поле допуска. Рассмотрим относительно простую задачу: вычислить методом статистических испытаний $P_г$, исходя из того, что качество изделий оценивается только по одной контролируемой величине и однозначно связано со свойствами комплектующих изделий (их параметрами или техническими характеристиками), причем свойства эти не зависят друг от друга.

Для решения этой задачи необходимо знать:

а) как распределены параметры (входные величины, свойства элементов, входящих в устройство) – X_i, $i = 1, \ldots, n$;

б) как связаны эти величины с выходными (контролируемыми) свойствами Y готового изделия, по которым оценивается выход годных, т.е. зависимость $Y(X_1, \ldots, X_n)$;

в) номинальное значение $Y_{ном}$, нижнюю Y_1 и верхнюю Y_2 границы для Y, такие, что при выполнении условия $Y_1 \leqslant Y \leqslant Y_2$ изделие признается годным.

Для схемы рис. 3.1, *а*, которую рассматриваем в качестве примера, X_i – это сопротивления пяти резисторов ($n = 5$). Функциональная связь в нашем случае задается алгоритмом вычисления, записанным в виде программы ПРЭС0.

Алгоритм вычислений состоит из следующих шагов:

1) выбрать пятерку случайных значений $X_1, \ldots, X_5$;

2) вычислить и запомнить Y;

3) повторить п. 1 и п. 2 N раз;

4) подсчитать число случаев, когда выполняется условие $Y_1 \leqslant Y \leqslant Y_2$. Отсюда находится $P_г$.

Наиболее сложным является выполнение п. 1. Для этого надо знать закон распределения каждого X_i и иметь ДСЧ, выдающие величины, соответствующие этим законам.

Для простоты будем исходить из предположения, что все X_i имеют одинаковый – равномерный закон распределения со своими интервалами варьирования для каждой переменной. (Более сложные случаи рассмотрим позже.) Кроме того, примем, что все они варьируются в пределах ±10% своего номинального значения. Наконец, примем, что $Y_{ном} = 3{,}79775$ Ом (см. стр. 90), а в 5%-ный допуск на выходную величину Y дает границы $Y_1 = 3{,}60787$ Ом и $Y_2 = 3{,}98764$ Ом.

Описанный алгоритм вычислений реализуется программой ПМК2.

```
100 REM ************************************
102 REM * ПОДСЧЕТ ЧИСЛА ГОДНЫХ С УЧЕТОМ     *
104 REM * КОЛЕБАНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ В НЕТВЯХ. *
106 REM * РАВНОМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ.        *
108 REM * НАЗВАНИЕ: 'ПМК2' .                *
```

```
110  REM ************************************
120  DIM A[5],C[5],R[5],Y[250]
122  REM M - ЧИСЛО АРГУМЕНТОВ
124  LET M=5
126  REM N1 - ДОПУСК НА ФУНКЦИЮ ОТКЛИКА (%)
128  LET N1=5
130  REM N2 - ДОПУСК НА АРГУМЕНТЫ (%)
132  LET N2=10
134  REM ВВОД НОМИНАЛОВ И ПОДСЧЕТ ГРАНИЦ
136  FOR J=1 TO M
138  READ R[J]
140  LET A[J]=(100-N2)/100*R[J]
142  LET C[J]=2*N2/100*R[J]
144  NEXT J
146  GOSUB 1000
148  LET R0=R
150  LET R1=(100-N1)/100*R0
152  LET R2=(100+N1)/100*R0
154  PRINT "ГРАНИЦЫ ДЛЯ R:",R1,R2
156  PRINT "ВВЕДИТЕ ОБ'ЕМ ВЫБОРКИ N"
158  PRINT "(N=0 ПОЗВОЛЯЕТ ЗАВЕРШИТЬ ВЫЧИСЛЕНИЯ)."
160  INPUT N
162  IF N=0 THEN 182
164  REM ОСНОВНОЙ ЦИКЛ
166  FOR I=1 TO N
168  GOSUB 3000
170  GOSUB 1000
172  LET Y[I]=R
174  NEXT I
176  GOSUB 3100
178  PRINT "N=";N;" ПРОЦЕНТ ГОДНЫХ = ";T/N*100
180  GOTO 156
182  STOP
1000  REM ***************
1002  REM * ПП 'ПРЭСО' . *
1004  REM ***************
1010  REM   .   .   .
1020  RETURN
3000  REM ********************************************
3002  REM * ПРИСВОЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ЗНАЧЕНИЙ АРГУМЕНТАМ *
3004  REM ********************************************
```

```
3010  REM   .   .   .
3020  RETURN
3090  REM ************************
3092  REM * ПОДСЧЕТ ЧИСЛА ГОДНЫХ *
3094  REM ************************
3100  LET T=0
3110  FOR I=1 TO N
3120  LET T=T+SGN(1-SGN(Y[I]-R1)*SGN(Y[I]-R2))
3130  NEXT I
3140  RETURN
8900  REM --- ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ---
9000  DATA 6,2,1,5,4
9999  END
```

В ней используются ПП 1000 и ПП 3000, аналогичные тем, что приведены в тексте ПМК1. Строки 120–200 содержат ввод и подготовку данных. В структуре программы выделена ПП 3100 для подсчета частоты появления годных изделий, а в общем случае это может быть ПП для любой статистической обработки результатов моделирования.

Проведя вычисления по программе ПМК2 при указанных выше исходных данных при $N = 200$ получим $P_г = 89{,}2\%$.

▼ В состав математического обеспечения для метода МК должны входить: 1) программа – модель объекта или процесса; 2) датчики случайных чисел; 3) программы обработки результатов.

Математическая модель – это функциональная связь между выходной величиной (будем еще использовать термины "функция" и "функция отклика") и одной или несколькими входными величинами (как синоним–аргументы, независимые факторы). Для схемы на рис. 2.1 аргументы – это сопротивления ветвей, функция – общее сопротивление схемы.

Математическая модель может быть задана в виде явной функции (4.1) или в виде алгоритма ее вычисления. (Последнее даже для простых объектов часто удобнее, чем использовать явную функцию.)

Случайные числа в соответствии с исходной информацией о распределении аргументов вырабатываются разными ДСЧ. При обращении к ним передаются параметры закона распределения, а на выходе получаем значение случайной величины.

Программы обработки результатов осуществляют накопление массивов, оценку статистических характеристик, частотные распределения и их печать.

Описанным частям МО должен предшествовать блок ввода данных (информация о законе распределения аргументов и объем выборки). Алгоритм программ достаточно прост: вырабатываются случайные чис-

ла, по ним находится значение функции, процесс циклически повторяется с накоплением массива, который по достижении нужного объема подвергается статистической обработке.

В большинство известных применений метода МК ставится задача вычисления математического ожидания случайной величины [48]. В отличие от этого при статистическом анализе (расчете) качества методом МК определяются процент годных, коэффициент вариации, дисперсия – величины, характеризующие разброс, вариативность, повторяемость.

К особенностям программ для метода МК относятся повышенные затраты машинного времени, и соответственно большее внимание при их разработке уделяется быстродействию и длительности вычислений, объему требуемой памяти (так как необходимо накапливать значительные объемы информации). О некоторых способах экономии машинных ресурсов см. в § 4.3.

В заключение отметим, что с более строгими определениями понятий и постановкой задачи метода МК можно ознакомиться по [44, 48, 51].

4.3. ДСЧ и обработка данных

▼ В данном параграфе остановимся лишь на некоторых типах ДСЧ, более детально с ними можно познакомиться по [48, 49].

Алгоритмы, на которых строятся ДСЧ, основаны на некоторых операциях с числами, равномерно распределенными в интервале (0,1). В языке БЕЙСИК во всех его более чем 40 версиях имеется функция RND – датчик случайных чисел, равномерно распределенных в интервале от 0 до 1. Не останавливаясь на способах проверки вероятностных характеристик вырабатываемых им чисел, укажем, что для целей технических расчетов, описываемых в данном параграфе, он вполне приемлем и удовлетворяет большинство предъявляемых требований.

Для того чтобы получить случайную выборку чисел равномерно распределенных в интервале от A до B следует ввести простое преобразование

```
X = A + (B – A) * RND(1)
```

▼ Наиболее часто в расчетах применяются нормально распределенные числа. На практике это обосновывается следующими соображениями. Все электротехнические свойства изделий формируются под влиянием большого числа факторов (до нескольких десятков), поэтому естественно предполагать, что в этом случае применима центральная предельная теорема теории вероятностей, а свойства изделий подчиняются нормальному закону. Разумеется, эти соображения требуют проверки с привлечением различных критериев согласия (хи-критерий, критерий Колмогорова и др.) по методикам, описанным в литературе по математической

статистике (см., например, [50] и др.). И хотя не во всех случаях предположение это проверяется и тем более подтверждается достаточно строго, однако нормальное распределение остается наиболее популярным в приложениях.

Получение нормально распределенных чисел возможно по различным алгоритмам. В общем случае [51] существуют два пути преобразования случайных равномерных чисел в нормальные:

а) использование условий предельной теоремы теории вероятностей;

б) прямое преобразование.

В первом случае используется центральная предельная теорема теории вероятностей: распределение суммы n независимых случайных величин с одинаковым законом распределения стремится к нормальному при возрастании n (более точные и строгие формулировки теоремы см. в [20, 51]). Если слагаемые X_i распределены равномерно в интервале (0,1), то сумма таких чисел

$$S = \sum_{i=1}^{n} x_i$$

имеет распределение с математическим ожиданием $M = n/2$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma = \sqrt{n/2}$. Применив преобразование по формуле

$$t = (m - S)/\sigma,$$

получим величины t, которые будут распределены по закону, приближающемуся с ростом n к стандартному нормальному с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Описанный алгоритм часто используется при расчетах на ЭВМ. Он реализован в ПП 6020.

```
6000  REM ****************************************
6002  REM * ДАТЧИК СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ,               *
6004  REM * РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПО НОРМАЛЬНОМУ ЗАКОНУ *
6006  REM * С МАТЕМАТИЧЕСКИМ ОЖИДАНИЕМ M=0 И     *
6008  REM * ДИСПЕРСИЕЙ D=1.                      *
6010  REM * НАЗВАНИЕ: 'ДСЧ1' .                  *
6012  REM ****************************************
6020  LET N7=6
6022  LET M7=1/SQR(N7/12)
6024  LET S7=0
6026  FOR L7=1 TO N7
6028  LET S7=S7+RND(1)
6030  NEXT L7
6032  LET S7=(S7-N7/2)*M7
```

```
6034  RETURN
6040  REM ****************************************
6042  REM * ДАТЧИК СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ,               *
6044  REM * РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПО НОРМАЛЬНОМУ ЗАКОНУ. *
6046  REM * НАЗВАНИЕ: 'ДСЧ2' .                    *
6048  REM ****************************************
6050  PRINT "ВВЕСТИ СРЕДНЕЕ И СР. КВ. ОТКЛОНЕНИЕ"
6052  INPUT M8,S8
6054  LET N7=6
6056  LET M7=S8/SQR(N7/12)
6058  LET S7=0
6060  FOR L7=1 TO N7
6062  LET S7=S7+RND(1)
6064  NEXT L7
6066  LET S7=M8+(S7-N7/2)*M7
6068  RETURN
```

В данной ПП нормальные числа получаются суммированием шести равномерно распределенных в интервале (0,1) случайных чисел. При ее использовании в программах для расчетов по методу МК строки 6020 и 6022 целесообразно вынести в ГП, что ускорит работу ПП. Этой же цели служит замена строк 6024–6030 на одну строку

6024 LET S7 = RND(1) + RND(1) + RND(1) + RND(1) + RND(1) + RND(1),

явно "нерациональный" вид которой неочевиден лишь в языке БЕЙСИК, так как такая запись сокращает затраты времени на выработку одного случайного числа на 50% и более.

В датчике число слагаемых N7 может быть изменено так: а) при стремлении получить распределение, более близкое к нормальному, N7 увеличивают до 10–12; б) при желании сократить время счета N7 уменьшают (обычно до 4).

▼ В практике расчетов используют не стандартное нормальное распределение, а такое, у которого произвольные параметры – ненулевое математическое ожидание и дисперсия, не равная 1. Для этой цели можно использовать ПП ДСЧ2, построенную на основе ПП ДСЧ1. В ней применяется преобразование, позволяющее переходить от стандартного нормального распределения для чисел X к произвольному нормальному для чисел Y по формуле Y = M8 + X * S8, где M8 и S8 – математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение распределения Y.

При единичном, разовом выполнении ПП ДСЧ2, отвечая на появляющийся запрос, следует ввести значения M8 и S8. А при включении ПП ДСЧ2 в ГП для вычислений по методу МК следует: а) исключить

строки 6050 и 6052, введя в ГП операции присвоения значений M8 и S8; б) строки 6052 и 6054 перенести в ГП; в) строки 6058–6064 заменить одной строкой, как это показано для ПП ДСЧ1.

Хотя нормальное распределение является одним из самых популярных, однако прежде чем его использовать (впрочем, это относится к любому теоретическому закону), необходимо провести довольно трудоемкую работу по проверке статистической гипотезы о том, что данное физическое свойство распределяется по закону, не отличающемуся от нормального. Имеются лишь отдельные случаи, когда этот вопрос решен достаточно убедительно. Для магнитных материалов, например, в [42] показано, что если для электротехнической стали индукция B_{25} распределена нормально, то свойства постоянных магнитов и ферритов имеют существенные отличия от нормального закона. В [58] показано, что большинство интересных для практических применений параметров полупроводниковых тиристоров подчиняется нормальному закону.

▼ Для получения случайных чисел Y_i с заданной плотностью вероятности $f(Y)$ следует решить относительно Y_i уравнение

$$\int_{-\infty}^{Y_i} f(Y)\,dY = X_i, \qquad (4.5)$$

где X_i – равномерно распределенные в интервале (0,1) числа.

В [51] приведены точные решения для экспоненциального и релеевского законов. Однако в большинстве случаев таких решений нет, поэтому опишем способ, основанный на кусочной аппроксимации [44].

Будем исходить из того, что экспериментально получен массив частот F, каждый элемент которого F_i дает относительную частоту попадания Y в интервал (Y_i, Y_{i+1}).

Задача состоит в том, что нужно разработать генератор случайных чисел, вероятность попадания которых в те или иные интервалы соответствует массиву F, т.е. при увеличении объема выборки получаемые частоты чисел, вырабатываемых этим генератором, асимптотически приближаются к заданному частотному распределению. Рассмотрим ее решение на трех примерах.

Когда число интервалов равно двум, им соответствуют частоты F_1 и F_2, причем $F_1 + F_2 = 1$. Для того чтобы реализовать случайное появление одного из двух событий A и B (A – попадание в первый интервал, B – попадание во второй) с заданными частотами, достаточно иметь ДСЧ с равномерно распределенными числами в интервале (0,1) и весь этот интервал разбить на отрезки, равные F_1 и $1 - F_1$. Тогда фрагмент программы

```
10 INPUT F(1)
20 LET T = RND(1)
30 IF T > F(1) THEN 60
```

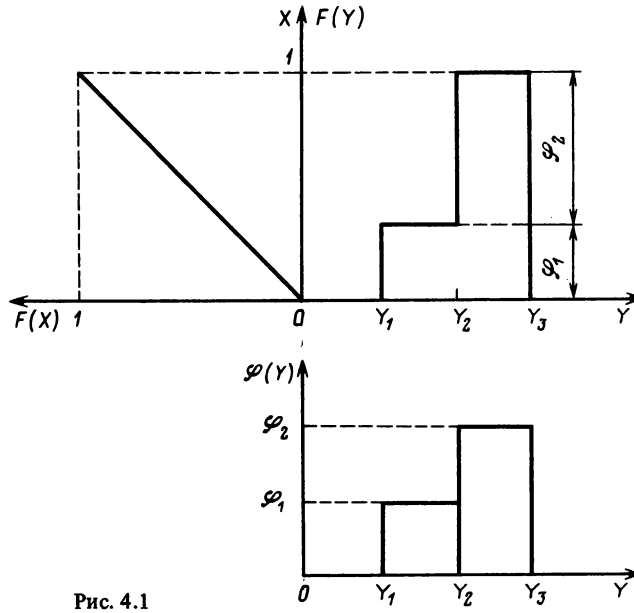


Рис. 4.1

```
40 PRINT "СОБЫТИЕ А"
50 GO TO 70
60 PRINT "СОБЫТИЕ В"
70 REM
```

реализует (разыгрывает) события A и B с заданными частотами. На рис. 4.1 приведена графическая иллюстрация этого алгоритма.

Если интервалов три и им соответствуют частоты $F_1 - F_3$, то надо по гистограмме рис. 4.2 (нижний график) построить дискретное интегральное распределение — найти накопленные частоты $X_1 = F_1$, $X_2 = F_1 + F_2$, $X_3 = F_1 + F_2 + F_3 = 1$.

Далее процедура та же, что и раньше: вырабатывается равномерно распределенное число, определяется, в какой из трех интервалов $(0, X_1)$, (X_1, X_2) и (X_2, X_3) оно попадает, на основании этого делается вывод о том, в какой из интервалов (Y_1, Y_2), (Y_2, Y_3) или (Y_3, Y_4) попало число Y Тогда Y приписывается значение полусуммы границ данного интервала.

Аналогично разыгрывается появление случайного числа Y, если его частотное распределение задано большим числом интервалов (на рис. 4.3 их пять).

▼ Таким образом, можно сформулировать общий алгоритм для программы, генерирующей случайные числа с заданным дискретным частот-

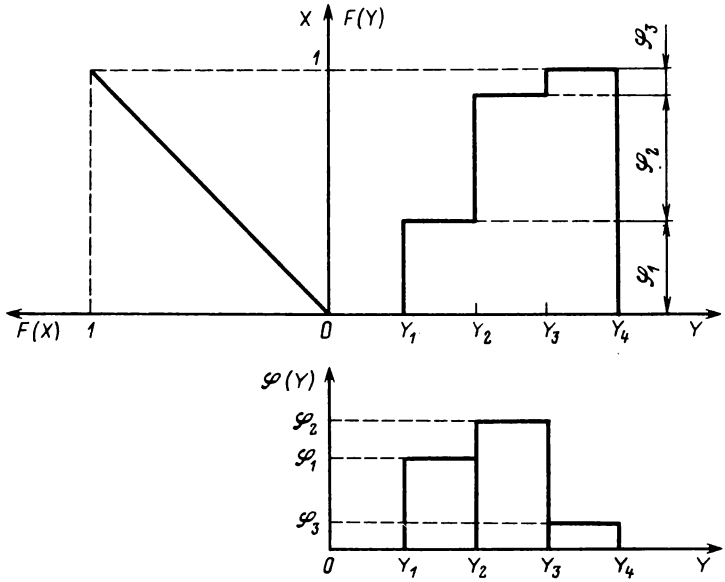

X
F(Y)
1
φ3
φ2
φ1
F(X)
1
0
Y1
Y2
Y3
Y4
Y
φ(Y)
φ2
φ1
φ3
0
Y1
Y2
Y3
Y4
Y

Рис. 4.2

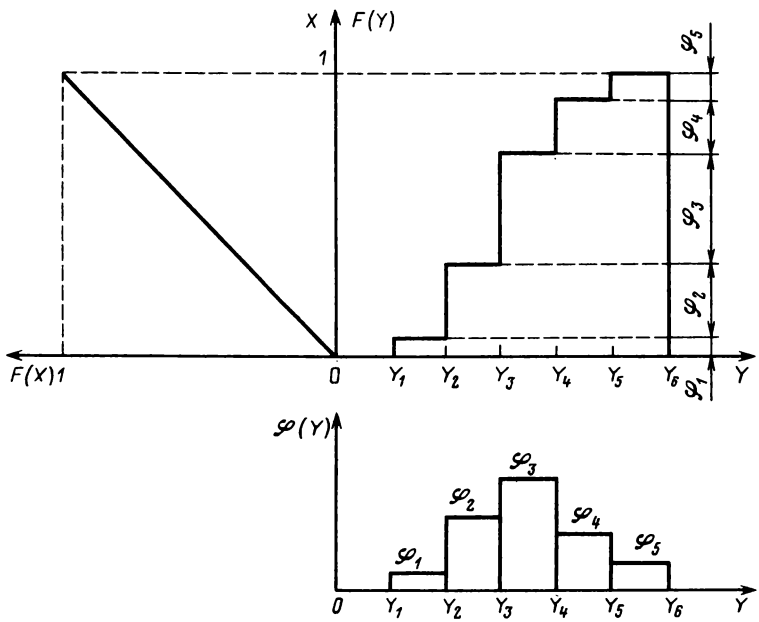

X
F(Y)
1
φ5
φ4
φ3
φ2
φ1
F(X)1
0
Y1
Y2
Y3
Y4
Y5
Y6
Y
φ(Y)
φ1
φ2
φ3
φ4
φ5
0
Y1
Y2
Y3
Y4
Y5
Y6
Y

Рис. 4.3

ным распределением: а) ввести интервалы Y и частоты для них; б) подсчитать нарастающие частоты (получить дискретное интегральное распределение); в) получить одно равномерно распределенное число X; г) определить, в какой интервал попало это число (обозначим номер этого интервала k); д) приписать Y значение середины интервала с тем же номером.

Полученная величина $(Y_k + Y_{k+1})/2$ и будет искомым случайным значением для Y.

Текст программы, реализующей данный алгоритм, – ПП ДСЧЗ – приведен ниже.

```
900  REM ******************************************
902  REM * ПОЛУЧЕНИЕ ВЫБОРКИ ИЗ N СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ,  *
904  REM * РАСПРЕДЕЛЕННЫХ В СООТВЕТСТВИИ С ЗАДАННЫМИ *
906  REM * ОТНОСИТЕЛЬНЫМИ ЧАСТОТАМИ F(I).          *
908  REM * НАЗВАНИЕ: 'ПМКЗ' .                      *
910  REM ******************************************
1000  DIM F[25],S[250],X[25],Y[25]
1002  PRINT "ВВЕДИТЕ ОБ'ЕМ ВЫБОРКИ (N)."
1004  INPUT N
1006  PRINT "ВВЕДИТЕ ЧИСЛО ИНТЕРВАЛОВ И ИХ ШИРИНУ."
1008  INPUT N1,D1
1010  PRINT "ВВЕДИТЕ НИЖНЮЮ ГРАНИЦУ Y";
1012  INPUT Y[1]
1014  PRINT "ВВЕДИТЕ ЧАСТОТЫ ИНТЕРВАЛОВ."
1016  LET X[1]=0
1018  FOR I=1 TO N1
1020  PRINT "ИНТЕРВАЛ N";I
1022  INPUT F[I]
1024  LET X[I+1]=X[I]+F[I]
1026  LET Y[I+1]=Y[I]+D1
1028  NEXT I
1030  LET D2=D1/2
1032  FOR J=1 TO N
1034  GOSUB 6090
1036  PRINT J;Y1
1038  NEXT J
1040  STOP
6070  REM ************************************
6072  REM * ДАТЧИК СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ С ЗАДАННЫМ *
6074  REM * ЭМПИРИЧЕСКИМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ       *
6076  REM * ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЧАСТОТ.             *
```

```
6078  REM * НАЗВАНИЕ: 'ДСЧ3' .                *
6080  REM ************************************
6090  LET T=RND(1)
6092  FOR I=1 TO N1
6094  IF T<X[I] THEN 6098
6096  NEXT I
6098  LET Y1=Y[I]-D2
6100  RETURN
9999  END
```

Программа ПМК3, вызывающая ПП ДСЧ3, позволяет реализовать описанный выше алгоритм. В ГП сначала вводятся число интервалов, их ширина и нижняя граница Y_i , вычисляются верхние границы интервалов $Y_i = Y_i + kD_1$, где i – номер интервала. Затем вводятся частоты F_i для отдельных интервалов и вычисляются накопленные частоты:

$$X_{i+1} = X_i + F_i .$$

После N-кратного обращения к ПП ДСЧ3 случайные значения Y накапливаются в массиве S.

Для проверки работы ПМК3 решим задачу получить выборку из 200 чисел, распределенных по нормальному закону с диапазоном варьирования (–3,5, 3,5), математическим ожиданием M = 0 и дисперсией D = 1. Для этого вводится число интервалов N1 = 10, ширина интервала 0,7 и нижняя граница Y(1) = –3,5. Затем вводятся частоты для каждого интервала, определенные по формуле

$$F_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{Y_i}^{Y_i+1} e^{-t^2/2} dt.$$

Они приведены в табл. 4.3. По ним находятся накопленные частоты (массив X), соответствующие интегралу

$$X_i = \Phi_i(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y_i+1} e^{-t^2/2} dt.$$

Случайная равномерно распределенная величина T сравнивается последовательно со значениями X_i , и таким образом находится номер интервала, в котором находится число Y. Затем полученный массив Y подвергается частотному анализу – подсчитываются частоты K_i попадания Y в тот или иной интервал. Результаты для объема выборки $N = 200$ и $N = 1000$ приведены в двух последних столбцах табл. 4.3.

Программа ДСЧ3 является универсальной – она вырабатывает дискретные числа для произвольно заданного частотного распределения.

Таблица 4.3

№ интервала	Границы интервала		F_i, %	K_i при	
				$N=200$	$N=1000$
1	−3,5	−2,8	0,2555	1,5	0,3
2	−2,8	−2,1	1,531	2,0	1,2
3	−2,1	−1,4	6,289	3,5	5,2
4	−1,4	−0,7	16,1	16,5	19,1
5	−0,7	0	25,8	29,5	26,2
6	0	−0,7	25,8	27,0	24,3
7	0,7	1,4	16,1	13,5	17,1
8	1,4	2,1	6,289	4,5	6,0
9	2,1	2,8	1,531	2,0	1,4
10	2,8	3,5	0,2555	0	0,2

Причем последнее может быть как эмпирического происхождения, так и может быть получено путем расчета по известному теоретическому закону распределения.

Отметим, что в описанном алгоритме использована кусочно-постоянная аппроксимация вероятностного распределения. Более точной является кусочно-линейная аппроксимация, которая используется в некоторых известных системах моделирования. Однако рассматривать ее не будем.

▼ Как отмечалось в § 4.2, математическое обеспечение для метода МК должно содержать программы обработки полученных в результате моделирования данных. Это чаще всего отдельные ПП для статистической обработки – вычисление процента годных, среднего ($\bar{X}$), дисперсии (D) и среднеквадратичного отклонения (σ). Алгоритмы этих ПП общеизвестны, поэтому далее приводятся их тексты с минимальными пояснениями.

ПП СТАТ1 вычисляет $\bar{X}$, D и σ для массива X длиной N (объем выборки равен N), подготовленного в ГП.

```
6110  REM ************************************
6112  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ СРЕДНЕГО, ДИСПЕРСИИ И *
6114  REM * СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОГО ОТКЛОНЕНИЯ   *
6116  REM * НАЗВАНИЕ: 'СТАТ1' .              *
6118  REM ************************************
6120  LET S=0
6122  LET D=0
6124  FOR I=1 TO N
6126  LET S=S+X[I]
6128  NEXT I
```

```
6130  LET S=S/N
6132  FOR I=1 TO N
6134  LET D=D+(S-X[I])*(S-X[I])
6136  NEXT I
6138  LET D=D/(N-1)
6140  LET S1=SQR(D)
6142  PRINT " N","СРЕДНЕЕ","ДИСПЕРСИЯ","СРЕДНЕКВ. ОТКЛ."
6144  PRINT N,S,D,S1
6146  RETURN
```

Весьма часто возникает необходимость в определении частотного распределения полученного массива результатов моделирования. Для подсчета частот по отдельным интервалам, на которые делится весь диапазон варьирования случайной величины X, используется ПП СТАТ2.

Она получает несгруппированный массив X из ГП, запрашивает нужное число интервалов (обычно 10–15), на которое надо разбить этот диапазон, находит нижнюю и верхнюю границы этого диапазона (минимальное и максимальное значения для массива X), ширину одного интервала и, наконец, подсчитывает частоты. На печать выводятся номер интервала, абсолютная и относительная (в процентах) частоты.

```
6150  REM ****************************************
6152  REM * ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ . *
6154  REM * НАЗВАНИЕ: 'СТАТ2' .                   *
6156  REM ****************************************
6160  PRINT "ВВЕДИТЕ ЧИСЛО ИНТЕРВАЛОВ."
6162  INPUT K1
6164  REM ПОИСК MAX И MIN
6166  LET U=X[1]
6168  LET W=X[2]
6170  FOR I=1 TO N
6172  IF X[I]>U THEN 6176
6174  LET U=X[I]
6176  IF X[I]<W THEN 6180
6178  LET W=X[I]
6180  NEXT I
6182  LET D1=(W-U)/K1
6184  REM ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ
6186  FOR I=1 TO K1
6188  LET K[I]=0
6190  NEXT I
6192  FOR I=1 TO N
```

```
6194  LET M=INT((X[I]-U)/D1)+SGN(W-X[I])
6196  LET K[M]=K[M]+1
6198  NEXT I
6200  REM ПЕЧАТЬ АБСОЛЮТНЫХ И ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЧАСТОТ
6202  FOR I=1 TO K1
6204  PRINT I;K[I];K[I]/N*100;"(%)"
6206  NEXT I
6208  RETURN
```

▼ Задачи, приводящие к многовариантным расчетам, – нахождение оптимума, определение частотных характеристик, оценка разброса методом МК – являются наиболее трудоемкими, точнее ресурсоемкими, поскольку требуют и значительных затрат машинного времени, и много места в оперативной памяти. Поэтому немаловажное значение имеют различные способы экономии машинных ресурсов. Упомянем некоторые из них.

Метод МК требует постоянного обращения к ДСЧ. Каждое такое обращение к ПП, реализующей генератор случайных чисел, занимает на разных ЭВМ около 5–15 мс, если учитывать только вызов ПП и возвращение из нее в ГП. Число таких вызовов для задач средней сложности (например, при пяти аргументах в математической модели) и при объеме выборки около 1000 равно 5000 для получения только одной выборочной характеристики. Сократить время, затрачиваемое на эту процедуру, можно путем накопления случайных чисел в некотором вспомогательном массиве (100–250 шт.) и постепенного их использования по мере надобности. Это усложняет структуру программы, но позволяет несколько снизить затраты времени.

Того же можно достичь, если использовать при моделировании предварительное частичное замещение схем (метод подсхем) [52, 53]. Из схемы выделяется некоторая часть, для которой известно, что вероятностное распределение соответствующего параметра Y_1 или параметры этого распределения не меняются со временем. Для этой части – подсхемы – реализуется алгоритм МК и находится распределение (гистограмма) некоторой промежуточной величины Y_1. Затем модель заменяется на упрощенную, и для нее снова проводятся статистические испытания. Таким образом, модель $Y=f(X_1, \ldots, X_5)$ заменяется двумя: $Y_1=f_1(X_1, X_2, X_3)$ и $Y_2=f_2(Y_1, X_4, X_5)$, для каждой из них реализуется алгоритм МК, результаты, полученные на первой подмодели, многократно используются при моделировании на второй. При достаточно продуманном разделении и большом числе факторов этот прием позволяет снизить затраты времени на порядок, так как каждый раз, когда нужно очередное значение Y_1, оно получается обращением к одному и тому же массиву, где записаны случайные значения Y_1, или к ДСЧ,

моделирующему распределение чисел, соответствующее гистограмме Y_1.

Можно повысить эффективность вычислительного процесса, если более рационально организовать моделирование, изменяя его ход в режиме диалога, производить адаптацию программ к специфическим свойствам решаемых задач на различных этапах проектирования в различные моменты времени [54].

При большом числе факторов допустимо предварительно оценить вклад каждого из них в суммарную дисперсию или вариацию функции отклика. Выделяются те из них, которые вносят незначительный вклад (порядка 1–2% каждый или 5–10% вместе). Предполагая, что такие факторы не подвержены статистическим флюктуациям (т. е. полагая, что их дисперсии равны нулю), можно без ущерба для точности сократить общий объем испытаний (а следовательно, и время расчетов) более чем на порядок. Такой подход требует предварительных пробных вычислений для оценки значимости аргументов. Это достаточно удобно провести, использовав диалоговый режим расчета на ПЭВМ.

Кроме больших затрат времени метод МК требует и накопления значительных массивов статистической информации для ее последующей обработки и анализа. Чтобы избежать этого, обычно используют интегральные характеристики (частота, моменты и др.). Однако в этом случае все-таки приходится затрачивать определенные усилия на размещения и выборку информации. Для того чтобы несколько сократить размерности используемых массивов, применяют (что особенно важно при работе на ПЭВМ с ограниченной оперативной памятью) прием декомпозиции процесса вычисления на части: после накопления $N = 100 \div 250$ значений функции отклика моделирование прерывается, вызывается ПП обработки данных, которая находит среднее, дисперсию и т. п. Затем весь процесс повторяется. А после каждого такого шага выборочные статистики усредняются.

Если этот прием использовать при $N = 1$, т. е. обновлять значения выборочных характеристик после каждого нового значения функции, то получим так называемый "пошаговый алгоритм вычисления статистик" (ПАВС), когда статистики вычисляются на каждом шаге машинного эксперимента.

ПАВС реализован в ПП СТАТ3.

```
6210  REM ************************************
6212  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ СРЕДНЕГО, ДИСПЕРСИИ И *
6214  REM * СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОГО ОТКЛОНЕНИЯ.  *
6216  REM * ПОШАГОВЫЙ АЛГОРИТМ.              *
6218  REM * НАЗВАНИЕ: 'СТАТ3' .              *
6220  REM ************************************
6230  LET S1=0
```

```
6232  LET S2=0
6234  FOR I=1 TO N
6236  LET S1=S1+X[I]
6238  LET S2=S2+X[I]*X[I]
6240  NEXT I
6242  LET S=S1/N
6244  LET D=(S2-N*S*S)/(N-1)
6246  LET S1=SQR(D)
6248  PRINT " N","СРЕДНЕЕ","ДИСПЕРСИЯ","СРЕДНЕКВ. ОТКЛ."
6250  PRINT N,S,D,S1
6252  RETURN
```

При вызове этой ПП в ГП подготавливается очередное значение некоторой величины X_i , для которой надо определить среднее, дисперсию и среднеквадратичное отклонение, это значение X_i передается в ПП СТАТ3, где накапливаются суммы и печатаются текущие значения выборочных характеристик для i-го шага.

Применение ПАВС позволяет полностью отказаться от хранения массивов большой размерности (известно, что введение массивов большой размерности затруднительно на программах на языке БЕЙСИК). Вместо них нужны всего две ячейки памяти для накопления текущих сумм S1 и S2. А перенеся строки 6266–6267 в ГП, можно сократить затраты времени на вызов ПП и возвращение из нее. Экономию времени счета можно получить так же, перенеся строки 6230, 6232, 6236 и 6238 в ГП. При выполнении вычислений по методу статистических испытаний желательно иметь возможность графически отображать получаемую информацию – как гистограммы (характеризующие форму кривой распределения полученной статистической величины), так и графики (зависимости величины, по которой оценивается распределение в целом от объема выборки и других аргументов). Это обусловлено сложностью, а зачастую невозможностью априорной оценки результатов расчетов. Кроме того, в ряде случаев не существуют объективные надежные методы оценки вычислительных моделей [41], а выявление аппаратных сбоев или различных ошибок, допущенных пользователем, – достаточно сложная задача.

Наблюдая график изменения параметра (доля, среднее и т. п.) "во времени", т. е. по мере наращивания числа испытаний, можно оценить момент возможного прекращения статистического моделирования ввиду достижения удовлетворительной точности. Тогда можно прекратить опыт, перейти к новому набору аргументов или следующему этапу исследования.

4.4. Примеры применения метода МК

▼ С помощью программ, аналогичных по структуре ПМК2, можно решать широкий круг задач статистического анализа качества [44]. Среди них укажем некоторые:

а) оценка разброса свойств изделия при заданных распределениях входных параметров;

б) оценка его влияния на процент годных в производстве;

в) анализ влияния отдельных факторов.

Приведем пример решения первой задачи.

В [55] исследовался разброс максимального M_{max} и пускового $M_{\text{п}}$ моментов асинхронного двигателя. В качестве математических моделей были приняты

$$M_{max} = f_1(w_1,\ d_{\text{пр}},\ \rho,\ l_1,\ \delta,\ l_2);$$

$$M_{\text{п}} = f_2(w_1,\ d_{\text{пр}},\ l_1,\ \delta,\ l_2),$$

где w_1 – число витков обмотки статора; $d_{\text{пр}}$ – диаметр провода обмотки статора; ρ – удельное сопротивление материала короткозамкнутой обмотки ротора; l_1 – длина пакета статора; δ – величина воздушного зазора; l_2 – длина пакета ротора.

В моделях следовало бы учитывать и среднюю длину витка обмотки статора, однако вариация ее столь мала по сравнению с разбросом других факторов, что ею можно пренебречь.

Для всех факторов было принято нормальное распределение, параметры которого для каждой величины приведены в табл. 4.4. С учетом того что все факторы являются независимыми, проводилось статистическое моделирование: вырабатывались шесть псевдослучайных нормально распределенных чисел, они преобразовывались к заданным параметрам распределения, подставлялись в модель и находились одно значение M_{max} и одно значение $M_{\text{п}}$. Эти величины запоминались и весь процесс повторялся 1000 раз. По этим двум накопленным выборкам находились (табл. 4.5) среднее значение и характеристики

Таблица 4.4

№ фактора	1	2	3	4	5	6
Единица измерения	шт.	мм	$\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	см	мм	см
$\bar{X}$	135	1,35	0,065	14,5	0,45	15
σ	0,9	0,0108	0,0075	0,203	0,028	0,18

Таблица 4.5. **Результаты моделирования при $N=1000$**

Параметр	$\bar{X}$, Н · м	D, Н · м^2	σ, Н · м	V, %
M_{max}	201,5	0,793	2,81	13,82
$M_{\text{п}}$	201	2,21	4,69	23,45

разброса: дисперсия, среднеквадратичное отклонение σ, коэффициент вариации V.

▼ Приведенные в таблице данные позволяют уже на стадии проектирования электрической машины оценить ожидаемый разброс ее выходных параметров и допуски на них. Так, например, примем в качестве предельно допустимого отклонения для моментов трехсигмовые пределы. Тогда для максимального момента получаем $M_{max}=201{,}5 \pm \pm 1{,}41$ Н · м (допуск ± 7%). Такой допуск приведет к почти 100%-ной годности изделий, поскольку обеспечит попадание 99,73% всех значений в поле допуска. Однако, если рассматривать его во взаимосвязи с другими технико-экономическими показателями, то допуск придется уменьшить.

▼ При анализе технологического процесса (с целью повысить однородность, воспроизводимость свойств, сократить брак) возникает задача определить, какой из технологических факторов оказывает наибольшее влияние на качество. Таким образом, возникает задача проранжировать факторы, оценить вклад каждого из них в дисперсию функции.

В [45] исследовано методом МК влияние различных факторов на среднеквадратичное отклонение тока в цепи нагрузки $\sigma(I_{\text{н}})$ дросселя с подмагничиванием постоянным током. В качестве модели, содержащей девять факторов, используется соотношение

$$I_{\text{н}} = U/\sqrt{(R_{\text{н}} + R_{\text{р}})^2 + (X_{\text{н}} + X_{\text{р}})^2}, \qquad (4.11)$$

где U – напряжение в цепи нагрузки; $R_{\text{н}}$, $R_{\text{р}}$, $X_{\text{н}}$ и $X_{\text{р}}$ – активное и реактивное сопротивления нагрузки и рабочей обмоток:

$$X_{\text{р}} = 2\pi f L; \quad L = w_{\text{р}}^2 \mu_r S/l;$$

здесь f – частота; $w_{\text{р}}$ – число витков рабочей обмотки; S и l – сечение и средняя длина силовой линии магнитопровода; μ_r – относительная начальная проницаемость материала.

По методу МК был произведен расчет среднеквадратичного отклонения $I_{\text{н}}$, основанный на определенных из эксперимента данных по разбросу всех аргументов, входящих в (4.11). Закон распределения для них принимался соответствующим нормальному. Объем выборки для получения одной точки зависимости равнялся 1000.

Были получены зависимости типа $\sigma(Y) = f(\sigma_i)$, т. е. определялось влияние дисперсии отдельных факторов на разброс Y. Установлено, что среди последних важную роль играет однородность начальной проницаемости магнитного материала: сокращение $\sigma(\mu)$ на 20% приводит к уменьшению $\sigma(I_н)$ на 18%. Отсюда следует рекомендация добиться снижения разброса проницаемости или путем более точного регулирования технологии изготовления магнитопроводов, или путем внедрения промежуточного контроля по этой величине.

Там же исследовались зависимости типа $\sigma(Y) = f(X_i)$. Расчеты показали, что разброс выходной величины зависит также и от номинальных (средних) значений аргументов: некоторые эти зависимости оказались статистически значимыми. В частности, было установлено, что с ростом $\overline{X}_р$ разброс $I_н$ уменьшается, а повышение номинального значения начальной проницаемости магнитопровода на 30% позволяет сократить $\sigma(I_н)$ на 18%. Это свидетельствовало о том, что для данного изделия были неверно установлены номинальные значения для $X_р$ и μ.

▼ Еще одну задачу оценки влияния дисперсии (или иной характеристики разброса) независимых факторов можно решить с помощью программ типа ПМК2: определить, как изменяется процент годных $P_г$ в зависимости от ширины поля допуска на один из факторов X_i или от его номинала. Такое исследование ведется так, что все факторы, кроме заданного X_i, варьируют случайным образом в соответствии с теми значениями параметров распределения, которые для них установлены, а для фактора X_i берется сначала одно значение параметра (например, дисперсии), потом следующее – увеличенное на некоторый шаг. И таким образом строится зависимость $P_г = f(\sigma_i)$ или $P_г = f(X_i)$.

В [55] исследована зависимость дисперсии максимального момента асинхронного двигателя от дисперсии факторов, определяющих его величину. С применением метода МК были получены результаты, которые в виде зависимостей $D(M_{max}) = f(D_i)$ обрабатывались с применением регрессионного анализа: определялись коэффициенты регрессии и их значимость для линейного уравнения

$$D(M_{max}) = a_i + b_i D_i,$$

где D_i – дисперсия i-го фактора.

Одна часть входных величин имела незначимые коэффициенты регрессии, две величины – значимые, но их влияние было признано небольшим, а дисперсия одного фактора – воздушного зазора – оказывает решающее влияние на разброс максимального момента двигателя. Таким образом, коэффициенты регрессии в данном случае играют роль коэффициентов влияния, определяемых и исследуемых в теории чувствительности, и позволяют произвести ранжировку факторов.

Отметим, что выявление наиболее важного фактора – это прямое указание на то, в каком направлении следует совершенствовать технологию данного двигателя – в данном случае в направлении резкого повышения точности обработки, чтобы обеспечить минимальные колебания воздушного зазора.

▼ Метод МК позволяет не только наметить пути улучшения технологии и контроля, но и произвести оптимизацию конструкции изделия. Дело в том, что нет никаких препятствий для определения еще одной группы зависимостей: $D(Y) = f(\bar{X}_1, \ldots, \bar{X}_n)$, т. е. выяснить, как влияют на дисперсию выходного свойства не дисперсия входных величин, как было показано выше, а их математические ожидания, величина которых собственно и есть формальное выражение конструкции изделия.

Для приводившегося выше примера было установлено, что на дисперсию пускового момента наибольшее влияние оказывает среднее значение удельного сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора: увеличение его на 10% вызывает уменьшение дисперсии $D(M_{\text{п}})$ на 41%. А на втором месте число витков обмотки статора: их увеличение позволяет снизить разброс пускового момента.

Такие результаты позволяют ставить вопрос об оценке проектируемых электротехнических изделий по ожидаемому разбросу их выходных технических характеристик и о проведении оптимизации ("статистическая оптимизация") конструкций с учетом влияния дополнительного критерия – дисперсии выходных величин, коэффициента вариации или процента годных. В качестве примеров таких работ в электронике можно указать [44, 56 и др.].

В краткой сводке задач анализа качества электротехнических изделий с применением метода МК, рассмотренных в данном параграфе, нами не рассмотрены такие важные случаи, как оценка качества по нескольким выходным критериям, или учет корреляционной связи между входными факторами.

Как уже отмечалось ранее, метод статистического моделирования пока не нашел широкого применения в практике проектирования электротехнических изделий и в их производстве. Однако увеличение доступности вычислительной техники и происходящее в настоящее время превращение ЭВМ (и особенно ПЭВМ) в рабочий инструмент инженера-электротехника позволяют надеяться, что преимущества и новые интересные возможности применения метода Монте-Карло будут оценены по достоинству и он не только будет использоваться в дальнейшем в системах автоматического проектирования, но и найдет свое место и в заводской практике.

ОСНОВНЫЕ ПОДПРОГРАММЫ

5.1. Решение систем линейных алгебраических уравнений

▼ В различных электротехнических задачах (расчет и анализ электрических цепей, теория управления и др.) возникает необходимость в составлении и решении систем алгебраических линейных уравнений. Кроме того, в ряде вычислительных алгоритмов требуется обращать матрицы и вычислять определители. В данном параграфе приведено несколько подпрограмм, предназначенных для подобных вычислений. В литературе по прикладной вычислительной математике как широко описаны сами алгоритмы, так и проведен анализ их точности и освещены другие вопросы их применения при расчетах на ЭВМ. Можно рекомендовать пособия и учебники [59–63].

Отсутствие в БЕЙСИКе локальных переменных и возможности передачи данных с помощью списка переменных вынуждает искать иные возможности: данные объединяются в массив, а затем в ПП передается только адрес – номер элемента, строки или столбца, с которых начинается данная группа данных [66]. Этот прием используется во всех ПП данной главы.

▼ В данном параграфе описаны три подпрограммы: одна из них (ПП 5200) предназначена для обращения матриц, а ПП 5600 и ПП 5800 позволяют решать системы линейных уравнений и находить детерминант матрицы. ПП 5200 и ПП 5600 производят вычисления с действительными, а ПП 5800 – с комплексными матрицами.

```
5190  REM **********************************
5192  REM * ПП ОБРАЩЕНИЯ R-МАТРИЦ МЕТОДОМ  *
5194  REM * ОБМЕНА ( N-КРАТНОГО ПЕРЕСЧЕТА  *
5196  REM * ЭЛЕМЕНТОВ,N - ПОРЯДОК МАТРИЦЫ )*
5198  REM **********************************
5200  LET KO=10↑(INT(LOG(A1)/LOG(10))+1)
5202  LET K1=A1+1
5204  FOR K=1 TO A1
5206  LET K2=K
5208  LET K3=K
5210  LET K4=ABS(A[K2,K3])
5212  FOR K5=K TO A1
5214  FOR K6=K TO A1
5216  LET K7=ABS(A[K5,K6])
5218  IF K7 <= K4 THEN 5226
5220  LET K2=K5
5222  LET K3=K6
```

```
5224  LET K4=K7
5226  NEXT K6
5228  NEXT K5
5230  LET A4=SGN(1+SGN(K4-A3))
5232  IF A4=0 THEN 5276
5234  LET K4=A[K2,K3]
5236  LET A[K,K1]=K2+K3/K0
5238  GOSUB 5278
5240  FOR K5=1 TO A1
5242  IF K5=K THEN 5254
5244  LET K6=A[K5,K]/K4
5246  FOR K7=1 TO A1
5248  LET A[K5,K7]=A[K5,K7]-A[K,K7]*K6
5250  NEXT K7
5252  LET A[K5,K]=K6
5254  NEXT K5
5256  FOR K5=1 TO A1
5258  LET A[K,K5]=-A[K,K5]/K4
5260  NEXT K5
5262  LET A[K,K]=1/K4
5264  NEXT K
5266  FOR K=A1 TO 1 STEP -1
5268  LET K3=INT(A[K,K1])
5270  LET K2=INT((A[K,K1]-K3)*K0+.5)
5272  GOSUB 5278
5274  NEXT K
5276  RETURN
5278  IF K=K2 THEN 5290
5280  FOR K5=1 TO A1
5282  LET K6=A[K,K5]
5284  LET A[K,K5]=A[K2,K5]
5286  LET A[K2,K5]=K6
5288  NEXT K5
5290  IF K=K3 THEN 5302
5292  FOR K5=1 TO A1
5294  LET K6=A[K5,K]
5296  LET A[K5,K]=A[K5,K3]
5298  LET A[K5,K3]=K6
5300  NEXT K5
5302  RETURN
```

Общей особенностью всех этих ПП является высокая степень унификации обращения к ним. Все коэффициенты матрицы должны быть размещены в двухмерном массиве A, причем, если решается система уравнений, столбец свободных членов размещается в крайнем правом столбце массива A. При работе с комплексными матрицами следует зарезервировать два массива: A – для действительных компонент и B – для мнимых. Перед обращением к ПП следует также указать в идентификаторе A1 порядок матрицы (или число уравнений), а в A3 – точность вычислений. Последний параметр необходим для контроля вырожденности матрицы: если в процессе вычислений значение наибольшего по модулю элемента (главного элемента) становится меньше A3, то дальнейшие операции прекращаются и осуществляется выход из ПП со значением A4 = 0. При естественном завершении работы ПП A4 ≠ 0. Таким образом, A4 указывает на то, как завершена работа. Поэтому прежде чем использовать результаты, полученные с помощью данной ПП, нужно проверить состояние A4. Сделать это можно, например, записав следующую последовательность операторов:

```
1090 IF A4 <> 0 THEN 1130
1100 PRINT "МАТРИЦА ВЫРОЖДЕНА"
1110 PRINT "ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРЕКРАЩАЮТСЯ"
1120 STOP
1130 REM ПРОДОЛЖЕНИЕ
```

которые следует вставить в ГП сразу же после обращения к ПП.

Параметр A2 задается только при вызове ПП 5600 и ПП 5800, в основу которых положен метод Гаусса [59–63].

```
5590  REM ************************************
5592  REM * РЕШЕНИЕ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ *
5594  REM * И ВЫЧИСЛЕНИЕ ДЕТЕРМИНАНТА МЕТОДОМ *
5596  REM * ГАУССА ( R-КОЭФФИЦИЕНТЫ )         *
5598  REM ************************************
5600  LET K1=A1+A2
5602  LET A4=1
5604  FOR K=1 TO A1
5606  LET K2=K
5608  LET K3=K
5610  LET K4=ABS(A[K2,K3])
5612  FOR K5=K TO A1
5614  FOR K6=K TO A1
5616  LET K7=ABS(A[K5,K6])
5618  IF K7 <= K4 THEN 5626
5620  LET K2=K5
5622  LET K3=K6
```

```
5624  LET K4=K7
5626  NEXT K6
5628  NEXT K5
5630  LET A4=SGN(1+SGN(K4-A3))*A4
5632  LET A5=A4
5634  IF A4=0 THEN 5666
5636  IF K=A1 THEN 5656
5638  LET KO=K
5640  GOSUB 5700
5642  FOR K5=K+1 TO A1
5644  LET K6=-A[K5,K]/A[K,K]
5646  FOR K7=K+1 TO K1
5648  LET A[K5,K7]=A[K5,K7]+K6*A[K,K7]
5650  NEXT K7
5652  NEXT K5
5654  LET A[K+1,1]=K3
5656  NEXT K
5658  IF A2>0 THEN 5668
5660  FOR K=1 TO A1
5662  LET A5=A5*A[K,K]
5664  NEXT K
5666  RETURN
5668  FOR K=A1 TO 1 STEP -1
5670  FOR K2=A1+1 TO K1
5672  FOR K3=K+1 TO A1
5674  LET A[K,K2]=A[K,K2]-A[K,K3]*A[K3,K2]
5676  NEXT K3
5678  LET A[K,K2]=A[K,K2]/A[K,K]
5680  NEXT K2
5682  NEXT K
5684  LET KO=A1+1
5686  FOR K3=A1 TO 2 STEP -1
5688  LET K=K3-1
5690  LET K2=A[K3,1]
5692  GOSUB 5714
5694  NEXT K3
5696  LET A4=1
5698  RETURN
5700  IF K=K3 THEN 5714
5702  FOR K5=1 TO A1
5704  LET K6=A[K5,K]
```

```
5706  LET A[K5,K]=A[K5,K3]
5708  LET A[K5,K3]=K6
5710  NEXT K5
5712  LET A4=-A4
5714  IF K=K2 THEN 5728
5716  FOR K5=K0 TO K1
5718  LET K6=A[K,K5]
5720  LET A[K,K5]=A[K2,K5]
5722  LET A[K2,K5]=K6
5724  NEXT K5
5726  LET A4=-A4
5728  RETURN
```

Параметр A2 служит ключом, позволяющим выбирать один из двух режимов работы. Если A2 = 0, то вычисляется детерминант матрицы, значение которого размещается в A5 (действительная часть при работе с ПП 5600) и в A5 и A6 (действительная и мнимая части при работе с ПП 5800). Если A2 = 1, то решается система линейных уравнений (ее порядок равен A1) и в столбце под номером A1 + 1 (крайний правый) массива коэффициентов размещаются свободные члены.

```
5790  REM ************************************
5792  REM * РЕШЕНИЕ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ *
5794  REM * И ВЫЧИСЛЕНИЕ ДЕТЕРМИНАНТА МЕТОДОМ *
5796  REM * ГАУССА ( С-КОЭФФИЦИЕНТЫ )        *
5798  REM ************************************
5800  LET K1=A1+A2
5802  LET A4=1
5804  FOR K=1 TO A1
5806  LET K2=K
5808  LET K3=K
5810  LET K4=A[K2,K3]*A[K2,K3]+B[K2,K3]*B[K2,K3]
5812  FOR K5=K TO A1
5814  FOR K6=K TO A1
5816  LET K7=A[K5,K6]*A[K5,K6]+B[K5,K6]*B[K5,K6]
5818  IF K7 <= K4 THEN 5826
5820  LET K2=K5
5822  LET K3=K6
5824  LET K4=K7
5826  NEXT K6
5828  NEXT K5
5830  LET A4=SGN(1+SGN(SQR(K4)-A3))*A4
```

```
5832  LET A5=A4
5834  IF A4=0 THEN 5880
5836  IF K=A1 THEN 5864
5838  LET KO=K
5840  GOSUB 5922
5842  LET K8=A[K,K]/K4
5844  LET K9=-B[K,K]/K4
5846  FOR K5=K+1 TO A1
5848  LET K2=-A[K5,K]*K8+B[K5,K]*K9
5850  LET K4=-A[K5,K]*K9-B[K5,K]*K8
5852  FOR K7=K+1 TO K1
5854  LET A[K5,K7]=A[K5,K7]+A[K,K7]*K2-B[K,K7]*K4
5856  LET B[K5,K7]=B[K5,K7]+A[K,K7]*K4+B[K,K7]*K2
5858  NEXT K7
5860  NEXT K5
5862  LET A[K+1,1]=K3
5864  NEXT K
5866  IF A2>0 THEN 5882
5868  LET A6=0
5870  FOR K=1 TO A1
5872  LET K2=A[K,K]*A5-B[K,K]*A6
5874  LET A6=A[K,K]*A6+B[K,K]*A5
5876  LET A5=K2
5878  NEXT K
5880  RETURN
5882  FOR K=A1 TO 1 STEP -1
5884  LET K4=A[K,K]*A[K,K]+B[K,K]*B[K,K]
5886  FOR K2=A1+1 TO K1
5888  FOR K3=K+1 TO A1
5890  LET A[K,K2]=A[K,K2]-A[K,K3]*A[K3,K2]+B[K,K3]*B[K3,K2]
5892  LET B[K,K2]=B[K,K2]-A[K,K3]*B[K3,K2]-A[K3,K2]*B[K,K3]
5894  NEXT K3
5896  LET K5=(A[K,K2]*A[K,K]+B[K,K2]*B[K,K])/K4
5898  LET B[K,K2]=(B[K,K2]*A[K,K]-A[K,K2]*B[K,K])/K4
5900  LET A[K,K2]=K5
5902  NEXT K2
5904  NEXT K
5906  LET KO=A1+1
5908  FOR K3=A1 TO 2 STEP -1
5910  LET K=K3-1
5912  LET K2=A[K3,1]
```

```
5914  GOSUB 5942
5916  NEXT K3
5918  LET A4=1
5920  RETURN
5922  IF K=K3 THEN 5942
5924  FOR K5=1 TO A1
5926  LET K6=A[K5,K]
5928  LET A[K5,K]=A[K5,K3]
5930  LET A[K5,K3]=K6
5932  LET K6=B[K5,K]
5934  LET B[K5,K]=B[K5,K3]
5936  LET B[K5,K3]=K6
5938  NEXT K5
5940  LET A4=-A4
5942  IF K=K2 THEN 5962
5944  FOR K5=K0 TO K1
5946  LET K6=A[K,K5]
5948  LET A[K,K5]=A[K2,K5]
5950  LET A[K2,K5]=K6
5952  LET K6=B[K,K5]
5954  LET B[K,K5]=B[K2,K5]
5956  LET B[K2,K5]=K6
5958  NEXT K5
5960  LET A4=-A4
5962  RETURN
```

Необходимость задания A2 > 1 возникает, например, при определении методом Гаусса обратной матрицы, когда одновременно нужно решить A1 систем линейных уравнений со свободными членами, представляющими собой векторы-столбцы единичной матрицы [60].

Подпрограмма ПП 5200 обращает действительную матрицу методом N-кратного пересчета элементов [59, 60]. Ее применение требует выделения в массиве A дополнительного A1 + 1 столбца для промежуточных результатов.

По окончании работы ПП 5200 на месте исходной матрицы размещается обратная, поэтому следует предусмотреть копирование первой, если в дальнейшем она будет нужна.

▼ В качестве примера использования ПП 5200 найдем матрицу, обратную следующей:

$$\begin{matrix} 1 & 2 \\ -3 & 4 \end{matrix}$$

Подготовим исходные данные с помощью фрагмента

```
 1 DIM A(2,3)
10 DATA 1,2,–3,4
20 LET A1 = 2
30 LET A3 = 1E – 20
40 FOR I = 1 TO A1
50 FOR J = 1 TO A1
60 READ A(I, J)
70 NEXT J
80 NEXT I
```

Вызов ПП осуществляем строкой

```
90 GOSUB 5200
```

а по окончании вычислений результаты выводим следующими строками:

```
100 PRINT "ОБРАТНАЯ МАТРИЦА"
110 FOR I = I TO A1
120 FOR J = I TO A1
130 PRINT  A(I, J);
140 NEXT J
150 PRINT
160 NEXT I
9999 END
```

(укажем, что для краткости здесь не производится контроль содержания A4). Обратная матрица имеет вид

```
 0,4   –0,2
 0,3    0,1
```

▼ ПП 5600 и ПП 5800 используют метод Гаусса с выбором главного элемента. Проиллюстрируем работу ПП 5600 на следующем примере:

$$X + 2Y = 7$$

$$-3X + 4Y = 9$$

Процедура подготовки исходных данных осуществляется тем же фрагментом, что был приведен выше (строки 1–80), в котором надо изменить строки

```
10 DATA 1,2,7,–3,4,9
50 FOR J = 1 TO A1 + 1
```

и добавить

```
25 LET A2 = 1
```

Вызов ПП производим строкой

```
90 GOSUB 5600
```

Результат вычислений выводим с помощью строк

```
100 PRINT "КОРНИ РАВНЫ"
110 FOR I = 1 TO A1
120 PRINT A(I,A1 + 1)
130 NEXT I
```

Он равен: $X_1 = 1$ и $X_2 = 3$.

Для вычисления детерминанта достаточно изменить лишь строку

```
25 LET A2 = 0
```

и вместо строк 100–160 записать

```
100 PRINT "ДЕТЕРМИНАНТ ="; A5
```

Единственное отличие для ПП 5800 состоит в том, что предварительно нужно заполнить два массива: A и B, разместив, как было отмечено выше, в массиве B мнимые компоненты коэффициентов матрицы и свободных членов.

▼ В заключение отметим, что во всех ПП используется ограниченное число идентификаторов простых переменных, начинающихся с букв A и K, а также идентификаторы двухмерных массивов A и B, которые необходимо описывать в ГП следующим образом:

```
DIM A(A1, A1+1)
```

при вызове ПП 5200 и

```
DIM A(A1, A1+A2), B(A1, A1+A2)
```

при вызове ПП 5600 и ПП 5800 (напомним, массив B используется и поэтому описывается только при вызове ПП 5400 и ПП 5800). Вместо A1, A2 и арифметических выражений следует в описании применять их числовые эквиваленты.

5.2. Действия с комплексными числами

▼ Из всех операций с комплексными числами для программирования были выбраны те, которые чаще всего используются в электротехнике, – комплексная арифметика, вычисление степени и гиперболических функций. Они, как показал опыт практических расчетов, наиболее употребительны в конкретных задачах. Всего было разработано 16 ПП (из них 2 вспомогательные), список которых приведен в табл. 5.1.

Для упрощения использования ПП приняты определенные ограничения, которые следует учитывать при разработке математического

Таблица 5.1

Номер первого оператора ПП	Назначение ПП (выполняемая операция)	Номера строк входных параметров	Вызываемые ПП
4210	$C_3^* = C_1 + C_2$	Z0, Z1, Z2	–
4220	$C_3 = C_1 C_2$	Z0, Z1, Z2	–
4240	$C_3 = C_1/C_2$	Z0, Z1, Z2	4220
4270	$C_3 = 1/C_1$	Z0, Z1	–
4290	$C_3 = \dfrac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$	Z0, Z1, Z2, Z4	4220, 4240 4320, 4330
4320	Запоминание входных параметров	Z1, Z2, Z3, Z5, Z6, Z7	–
4330	Восстановление входных параметров	Z1, Z2, Z3, Z5, Z6, Z7	–
4350	$A_3 = \text{mod}\ \{C_1\}$ $B_3 = \text{arg}\ \{C_1\}$	Z1	–
4390	$A_3 = \text{Re}\ \{C_1\}$ $B_3 = \text{Im}\ \{C_1\}$ $C_1 = A_1 \exp\ \{JB_1\}$	Z1	
4410	$C_3 = C_1^{0,5}$	Z1	4350, 4390
4430	$C_3 = C_1^{C_2}$	Z1, Z2	4220, 4320 4330, 4350 4390
4450	$C_3 = \exp\ \{C_1\}$	Z1	–
4470	$C_3 = \text{SH}\ \{C_1\}$	Z1, Z2	4320, 4330 4450
4500	$C_3 = \text{CH}\ \{C_1\}$	Z1, Z2	4470
4510	$C_3 = \text{TH}\ \{C_1\}$	Z1, Z2, Z4	4240, 4330 4470, 4500
4530	$C_3 = \text{ARC TH}\ \{C_1\}$	Z1	4350

* $C_k = A_k + JB_k$, A_k содержится в первом столбце массива Z, а B_k – во втором.

обеспечения с использованием операций с комплексными числами. В ПП применяется ограниченное число идентификаторов – двухмерный базовый массив Z(N, 2), переменные Z0, Z1, . . ., Z9 и C0, C1, . . ., C9. Эти идентификаторы желательно не использовать в ГП.

Все комплексные числа (как исходные данные, так и результаты вычислений) располагаются в базовом массиве Z(N, 2) по строкам: в первом столбце – действительная часть, во втором столбце – мнимая. Базовый массив Z описывается в ГП, число строк в нем (N) зависит от степени сложности программы. Благодаря принятой системе обозначений достигается экономия времени и длины текста.

При вызове той или иной ПП нет необходимости организовать пересылки исходных данных и результатов – достаточно указать лишь номера строк, в которых они размещаются. Для этого в Z1 и Z2 заносятся номера строк базового массива, содержащих исходные данные, а в Z3 – номер строки, в которую будет занесен результат расчета. (В некоторых случаях нужно дополнительно указать в Z4 номер вспомогательной строки базового массива, предназначенной для хранения промежуточных данных.)

ПП подразделяются на три группы: ПП алгебраических преобразований (сложение, умножение, деление и обращение комплексных чисел), ПП вычисления гиперболических функций от комплексного переменного и, наконец, группа программ для вычисления квадратного корня, экспоненты, возведения в степень, определения модуля и аргумента, перехода от одной формы записи комплексных чисел к другой. Чтобы сохранить исходные данные, применяются две вспомогательные ПП – для запоминания (ПП 4320) и для восстановления (ПП 4330) информации.

▼ Кратко остановимся на отдельных ПП.

```
4200  REM ************
4201  REM * СЛОЖЕНИЕ *
4202  REM ************
4210  LET Z[Z3,1]=Z[Z1,1]+Z[Z2,1]
4212  IF Z0=1 THEN 4216
4214  LET Z[Z3,2]=Z[Z1,2]+Z[Z2,2]
4216  RETURN
4217  REM ************
4218  REM * УМНОЖЕНИЕ *
4219  REM ************
4220  IF Z0=2 THEN 4226
4222  LET Z[Z3,1]=Z[Z1,1]*Z[Z2,1]
4224  RETURN
4226  LET Z=Z[Z1,1]*Z[Z2,1]-Z[Z1,2]*Z[Z2,2]
4228  LET Z[Z3,2]=Z[Z1,1]*Z[Z2,2]+Z[Z1,2]*Z[Z2,1]
4230  LET Z[Z3,1]=Z
4232  RETURN
4233  REM ***********
```

```
4234  REM * ДЕЛЕНИЕ *
4235  REM ***********
4240  IF Z0=2 THEN 4246
4242  LET Z[Z3,1]=Z[Z1,1]/Z[Z2,1]
4244  RETURN
4246  LET Z9=Z[Z2,1]*Z[Z2,1]+Z[Z2,2]*Z[Z2,2]
4248  LET Z[Z2,2]=-Z[Z2,2]
4250  GOSUB 4226
4252  IF Z3=Z2 THEN 4256
4254  LET Z[Z2,2]=-Z[Z2,2]
4256  LET Z[Z3,1]=Z[Z3,1]/Z9
4258  LET Z[Z3,2]=Z[Z3,2]/Z9
4260  RETURN
4261  REM *************
4262  REM * ОБРАЩЕНИЕ *
4263  REM *************
4270  IF Z0=2 THEN 4276
4272  LET Z[Z3,1]=1/Z[Z1,1]
4274  RETURN
4276  LET Z=Z[Z1,1]*Z[Z1,1]+Z[Z1,2]*Z[Z1,2]
4278  LET Z[Z3,1]=Z[Z1,1]/Z
4280  LET Z[Z3,2]=-Z[Z1,2]/Z
4282  RETURN
4283  REM *********************************
4284  REM * ПРЕОБРАЗОВАНИЕ Z1*Z2/(Z1+Z2) *
4285  REM *********************************
4290  IF Z0=2 THEN 4296
4292  LET Z[Z3,1]=Z[Z1,1]*Z[Z2,1]/(Z[Z1,1]+Z[Z2,1])
4294  RETURN
4296  GOSUB 4320
4298  LET Z3=Z4
4300  GOSUB 4210
4302  LET Z3=Z7
4304  GOSUB 4226
4306  LET Z1=Z3
4308  LET Z2=Z4
4310  GOSUB 4246
4312  GOSUB 4330
4314  RETURN
4315  REM *********************************
4316  REM * ЗАПОМИНАНИЕ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ *
```

```
4317  REM * ПАРАМЕТРОВ ПП                *
4318  REM ********************************
4320  LET Z5=Z1
4322  LET Z6=Z2
4324  LET Z7=Z3
4326  RETURN
4330  LET Z1=Z5
4332  LET Z2=Z6
4334  LET Z3=Z7
4336  RETURN
4337  REM ******************************************
4338  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ МОДУЛЯ И АРГУМЕНТА С-ЧИСЛА,   *
4339  REM * ПРЕДСТАВЛЕННОГО В АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ ФОРМЕ   *
4340  REM ******************************************
4350  LET C0=3.14159
4352  LET C1=Z[Z1,1]
4354  LET C2=Z[Z1,2]
4356  IF ABS(C2) <= ABS(C1) THEN 4364
4358  LET C3=C0/2-ATN(ABS(C1/C2))
4360  LET Z[Z3,1]=ABS(C2)/SIN(C3)
4362  GOTO 4368
4364  LET C3=ATN(ABS(C2/(C1+(1-SGN(ABS(C1))))))
4366  LET Z[Z3,1]=ABS(C1)/COS(C3)
4368  IF C1 >= 0 THEN 4372
4370  LET C3=C0-C3
4372  LET C4=INT(C3*SGN(SGN(C2)+.5)*180000./C0+.5)/1000
4374  LET C4=C4+360*(1-SGN(ABS(C4+180)))
4376  LET Z[Z3,2]=C4*C0/180
4378  RETURN
4379  REM ************************************
4380  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ И МНИМОЙ *
4381  REM * ЧАСТИ С-ЧИСЛА, ПРЕДСТАВЛЕННОГО  В  *
4382  REM * ВИДЕ МОДУЛЯ И АРГУМЕНТА            *
4383  REM ************************************
4390  LET C1=Z[Z1,1]
4392  LET C2=Z[Z1,2]
4394  LET Z[Z3,1]=C1*COS(C2)
4396  LET Z[Z3,2]=C1*SIN(C2)
4398  RETURN
4399  REM ****************************************
4400  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ КВАДРАТНОГО КОРНЯ С-ЧИСЛА *
4401  REM ****************************************
```

```
4410  GOSUB 4350
4412  LET Z[Z3,1]=SQR(Z[Z3,1])
4414  LET Z[Z3,2]=Z[Z3,2]/2
4416  LET Z7=Z1
4418  LET Z1=Z3
4420  GOSUB 4390
4422  LET Z1=Z7
4424  RETURN
4425  REM ***********************************
4426  REM * ВОЗВЕДЕНИЕ С-ЧИСЛА В С-СТЕПЕНЬ *
4427  REM ***********************************
4430  GOSUB 4320
4432  GOSUB 4350
4434  LET Z[Z3,1]=LOG(Z[Z3,1])
4436  LET Z1=Z3
4438  GOSUB 4226
4440  LET Z[Z3,1]=EXP(Z[Z3,1])
4442  GOSUB 4390
4444  GOSUB 4330
4446  RETURN
4447  REM ***********************************
4448  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭКСПОНЕНТЫ С-ЧИСЛА *
4449  REM ***********************************
4450  LET C8=EXP(Z[Z1,1])
4452  LET C9=Z[Z1,2]
4454  LET Z[Z3,1]=C8*COS(C9)
4456  LET Z[Z3,2]=C8*SIN(C9)
4458  RETURN
4459  REM *************************
4460  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ SH С-ЧИСЛА *
4461  REM *************************
4470  LET C7=-1
4472  GOSUB 4320
4474  GOSUB 4450
4476  LET Z3=Z2
4478  LET Z[Z1,1]=-Z[Z1,1]
4480  LET Z[Z1,2]=-Z[Z1,2]
4482  GOSUB 4450
4484  LET Z[Z7,1]=(Z[Z7,1]+C7*Z[Z3,1])/2
4486  LET Z[Z7,2]=(Z[Z7,2]+C7*Z[Z3,2])/2
4488  LET Z[Z1,1]=-Z[Z1,1]
```

```
4490  LET Z[Z1,2]=-Z[Z1,2]
4492  GOSUB 4330
4494  RETURN
4495  REM *************************
4496  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ CH С-ЧИСЛА *
4497  REM *************************
4500  LET C7=1
4502  GOSUB 4472
4504  RETURN
4505  REM *************************
4506  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ TH С-ЧИСЛА *
4507  REM *************************
4510  GOSUB 4470
4512  LET Z[Z4,1]=Z[Z3,1]
4514  LET Z[Z4,2]=Z[Z3,2]
4516  GOSUB 4500
4518  LET Z1=Z4
4520  LET Z2=Z3
4522  GOSUB 4246
4524  GOSUB 4330
4526  RETURN
4527  REM ******************************
4528  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ ARC TH С-ЧИСЛА *
4529  REM ******************************
4530  LET C8=1-Z[Z1,1]
4532  LET C9=Z[Z1,2]
4534  LET C7=C8*C8+C9*C9
4536  LET Z[Z3,1]=2*C8/C7-1
4538  LET Z[Z3,2]=2*C9/C7
4540  LET Z5=Z1
4542  LET Z1=Z3
4544  GOSUB 4350
4546  LET Z[Z3,1]=LOG(Z[Z3,1])/2
4548  LET Z[Z3,2]=Z[Z3,2]/2
4550  LET Z1=Z5
4552  RETURN
```

ПП 4210 позволяет складывать комплексные числа. До ее вызова слагаемые размещаются в строках массива Z с номерами Z1 и Z2. А сумма помещается в строке с номером Z3.

ПП 4220 и ПП 4240 производят умножение и деление. Размещение исходной информации и результатов аналогично предыдущему случаю.

Обратить комплексное число можно с помощью ПП 4270. Оно должно быть занесено в строчку с номером Z1 базового массива, а результат будет, как и в предыдущих случаях, помещен в строку с номером Z3 (параметр Z2 не используется).

Специфика электротехнических расчетов часто требует вычисления выражений типа C1 × C2/(C1 + C2), где C1 и C2 – комплексные числа. Эта операция выполняется с помощью ПП 4290, для которой также используется стандартное размещение информаций. Кроме того, нужно указать номер Z4 свободной строчки базового массива для размещения промежуточных результатов.

Для всех перечисленных выше программ указывается также значение ключа Z0. При Z0 = 1 все операции производятся с действительными числами, при Z0 = 2 действия выполняются с комплексными числами.

Гиперболические функции вычисляются по обычным математическим формулам [64]. Во всех ПП этой группы аргумент размещается в строке с номером Z1 базового массива, а результат – в строке с номером Z3.

ПП 4470, ПП 4500, ПП 4510 и ПП 4530 позволяют соответственно вычислять гиперболический синус, косинус, тангенс и арктангенс от комплексного числа.

Размещение промежуточных результатов для первых двух программ требует одной дополнительной строки с номером Z2, а для ПП 4510 – еще одной строки с номером Z4. Укажем также, что мнимая компонента комплексного числа гиперболического арктангенса определяется с точностью $2\pi k$, где $k = 1, 2, \ldots$

Следующая группа ПП – это ПП 4350, 4390, 4410 и 4450. ПП 4350 позволяет вычислять модуль и аргумент комплексного числа. В строке с номером Z1 следует поместить действительную и мнимую части комплексного числа, а результат помещается в строке с номером Z3: в первом столбце – значение модуля, во втором – аргумент в радианах.

ПП 4390 предназначается для решения обратной задачи.

ПП 4410 вычисляет главное значение квадратного корня из комплексного числа [65]. Как и ранее, в строках с номерами Z1 и Z3 размещаются исходное число и результат.

ПП 4430 возводит комплексное число в комплексную степень. В строках базового массива с номерами Z1–Z3 помещаются соответственно основание степени, ее показатель и результат. Назначение ПП 4440 – вычисление комплексной экспоненты. И в этом случае в Z1 указывается номер строки с показателем экспоненты, а в Z3 – адрес результата.

5.3. Решение нелинейных уравнений

Многие задачи в электротехнике сводятся к нахождению корней нелинейных уравнений. В данном параграфе приведены две ПП: ПП 6510 для определения действительного корня методом дихотомии, ПП 6550 для нахождения минимума функции методом золотого сечения.

Метод дихотомии (половинного деления) [60] для приближенного определения действительного корня уравнения $f(x) = 0$ реализован в ПП 6510. До обращения к ней необходимо найти интервал $[a, b]$, на границах которого $f(x)$ принимает значения, удовлетворяющие условию $f(a)f(b) < 0$. Последнее неравенство означает, что внутри интервала $f(x)$ пересекает ось абсцисс и, следовательно, имеет хотя бы один корень.

Исходными данными для ПП являются значения a и b, которые предварительно заносятся в Y(1,1) и Y(1,2) соответственно, а также заданная погрешность вычисления корня, указанная в Y0. В процессе работы в ПП неоднократно вычисляются значения функции $f(x)$ при различных величинах аргумента. Поскольку вид функции заранее не известен, следует подготовить ПП, вычисляющую $f(x)$ при x=Y1 и размещающую результат в Y2, и в строках 6514 и 6524 ПП 6510 записать обращение к ней. Однако если функция имеет достаточно простой вид, в указанных строках можно поместить оператор

```
LET Y2 = FNF(Y1)
```

и описать нужную функцию FNF в ГП.

По окончании работы ПП 6510 в Y1 будет расположено значение корня. Используемый в ПП массив Y размерности 2 × 2 следует описать в ГП.

```
6500  REM ************************************
6502  REM * ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ    *
6504  REM * ФУНКЦИИ С ОСЬЮ АБСЦИСС МЕТОДОМ   *
6506  REM * ДИХОТОМИИ (ПОЛОВИННОГО ДЕЛЕНИЯ) *
6508  REM ************************************
6510  FOR Y=1 TO 2
6512  LET Y1=Y[Y,1]
6514  REM GOSUB <ВЫЧИСЛЕНИЕ ФУНКЦИИ>
6516  LET Y[Y,2]=Y2
6518  NEXT Y
6520  LET Y1=(Y[1,1]+Y[2,1])/2
6522  IF ABS(Y[1,1]-Y[2,1]) <= Y0 THEN 6534
6524  REM GOSUB <ВЫЧИСЛЕНИЕ ФУНКЦИИ>
6526  LET Y=1+ABS(SGN(SGN(Y2)-SGN(Y[1,2])))
```

```
6528  LET Y[Y,1]=Y1
6530  LET Y[Y,2]=Y2
6532  GOTO 6520
6534  RETURN
```

▼ ПП 6550 решает более общую задачу – она позволяет приближенно найти абсциссу локального минимума функции $f(x)$ методом золотого сечения [60].

Исходные данные – границы интервала $[a, b]$, в котором ищется минимум, и значение погрешности – задаются так же, как и для вычисления значений функции. Обращение к последней ПП нужно разместить в строках 6570 и 6596. По окончании работы в Y1 содержится абсцисса минимума. Вспомогательный массив Y размерностью 4 × 2 следует описать в ГП.

```
6536  REM ********************************
6538  REM * ВЫЧИСЛЕНИЕ МИНИМУМА ФУНКЦИИ *
6540  REM * МЕТОДОМ ЗОЛОТОГО СЕЧЕНИЯ     *
6542  REM ********************************
6550  LET Y6=1
6552  GOTO 6556
6554  LET Y6=3
6556  LET Y7=ABS(Y[2,1]-Y[1,1])
6558  LET Y8=(SQR(5)-1)/2
6560  LET Y9=Y7*Y8
6562  LET Y[3,1]=Y[2,1]-Y9
6564  LET Y[4,1]=Y[1,1]+Y9
6566  FOR Y=Y6 TO 4
6568  LET Y1=Y[Y,1]
6570  REM GOSUB <ВЫЧИСЛЕНИЕ ФУНКЦИИ>
6572  LET Y[Y,2]=Y2
6574  NEXT Y
6576  LET Y9=Y9*Y8
6578  IF ABS(Y[2,1]-Y[1,1]) <= Y0 THEN 6602
6580  LET Y1=1+SGN(1+SGN(Y[4,2]-Y[3,2]))
6582  FOR Y=1 TO 2
6584  LET Y[Y1,Y]=Y[2+Y1,Y]
6586  LET Y[2+Y1,Y]=Y[5-Y1,Y]
6588  NEXT Y
6590  LET Y=5-Y1
6592  LET Y[Y,1]=Y[Y1,1]+SGN(1.5-Y1)*Y9
```

```
6594  LET Y1=Y[Y,1]
6596  REM GOSUB <ВЫЧИСЛЕНИЕ ФУНКЦИИ>
6598  LET Y[Y,2]=Y2
6600  GOTO 6576
6602  LET Y1=(Y[2,1]+Y[1,1])/2
6604  RETURN
```

5.4. Подпрограммы для ввода и вывода информации

Большинство современных версий языка БЕЙСИК обладают возможностями, позволяющими значительно усовершенствовать процедуры ввода и вывода информации, придать ей более наглядный вид, упростить действия пользователя и т. п. В связи с этим опишем ПП, аналогичные по своему назначению ПП 1700 и ПП 2000 (приведены в гл. 1 и 2) и построенные на основе версий языка, реализованных на ПЭВМ типов БК0010, ДВК, ЕС1840 и др.

Номера новых вариантов ПП совпадают с номерами ПП, описанных ранее. Это позволяет не вносить изменений в ГП, где имеется их вызов. Поэтому прежние версии ПП можно без существенных изменений заменить на более совершенные.

Опишем новый вариант ПП 2000 при условии, что данная ПП будет применяться только при расчете схем на постоянном токе. Она предназначена для ввода топологии схемы и параметров ветвей путем заполнения "электронной" ("экранной") таблицы, отображаемой на экране дисплея (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Ветвь	Узел 1	Узел 2	R[ОМ]	I[A]	E[B]
1	1	3	1.23	−10.1E−1	4.2E2
...	...	...	...	...	...

```
1994 REM ******************************************
1995 REM * ВВОД СОПРОТИВЛЕНИЙ ВЕТВЕЙ И ТОПОЛОГИИ  *
1996 REM * СХЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОЙ ТАБЛИЦЫ    *
1997 REM ******************************************
2000 REM === ПОДГОТОВКА ===
2010 DIM N(7),Nп(6),H(6)
2012 DEF FNK(K)=INT(P(K,1))
2014 DEF FNL(L)=INT((P(L,1)-FNK(L))*N0+.5)
2016 DATA 1000,0,0,6,7
2018 DATA 1,7,13,19,34,49,64
```

```
2020 DATA ВЕТВЬ,УЗЕЛ1,УЗЕЛ2,''     R(ОМ)''
2022 DATA ''     J(A)'',''     E(B)''
2024 READ N0,N1,N2,N6,N7
2026 FOR I=1 TO N6+1
2028 READ N(I)
2030 NEXT I
2032 FOR I=1 TO N6
2034 READ N¤(I)
2036 NEXT I
2038 FOR I=1 TO N
2040 FOR J=1 TO 4
2042 P(I,J)=0
2044 NEXT J
2046 NEXT I
2100 REM === ИЗОВРАЖЕНИЕ ===
2110 GOSUB 2300
2112 N9=1
2114 GOSUB 2380
2120 REM === ВВОД ===
2122 I=0
2124 K=N9+I
2126 IF K>N THEN I=I-1
2128 L=I*2+3
2130 LOCATE N(1),L,1
2132 N¤=INKEY¤
2134 IF N¤='''' THEN 2132
2136 IF N¤=''3'' THEN 2202
2138 IF N¤<>''И'' THEN 2146
2140 GOSUB 2240
2142 N9=I-1
2144 GOTO 2114
2146 J=ASC(N¤)
2148 IF NOT(J=26 OR J=27) THEN 2154
2150 I=I+SGN(J-26.5)-1
2152 GOTO 2194
2154 LOCATE N(1),L
2156 PRINT K
2158 FOR J=2 TO 6
2160 H(2)=FNK(K)
2162 H(3)=FNL(K)
2164 N¤=''''
```

```
2166 IF J>3 THEN N!=P(K,J-2)
2168 IF J=2 OR J=3 THEN N!=H(J)
2170 LOCATE N(J),L,1
2172 INPUT N¤
2174 IF N¤<>'''' THEN N!=VAL(N¤)
2176 LOCATE N(J),L
2178 PRINT STRING¤(N(J+1)-N(J)-1,'' '')
2180 LOCATE N(J),L
2182 PRINT N!
2184 IF J<4 AND N1<K AND N!<>0 THEN N1=K
2186 IF J>3 THEN P(K,J-2)=N!
2188 IF J=2 THEN P(K,1)=N!+H(3)/N0
2190 IF J=3 THEN P(K,1)=H(2)+N!/N0
2192 NEXT J
2194 I=I+1
2196 IF I>=0 AND I<N7 THEN 2124
2198 N9=N9+N7*SGN(I+.5)
2200 GOTO 2114
2202 FOR I=1 TO N1
2204 IF N2<FNK(I) THEN N2=FNK(I)
2206 IF N2<FNL(I) THEN N2=FNL(I)
2208 NEXT I
2210 RETURN
2230 REM === ИСКЛЮЧЕНИЕ СТРОКИ ===
2240 IF K>N1 THEN RETURN
2242 IF K=N1 THEN 2254
2244 FOR J=K+1 TO N1
2246 FOR L=1 TO 4
2248 P(J-1,L)=P(J,L)
2250 NEXT L
2252 NEXT J
2254 N1=N1-1
2256 RETURN
2300 REM === ЛИНИИ И ЗАГОЛОВКИ ===
2310 CLS
2312 K=(N7+1)*20+4
2314 FOR I=1 TO N6+1
2316 IF I=N6+1 THEN 2322
2318 LOCATE N(I),1
2320 PRINT N¤(I)
2322 J=3+(N(I)-1)*8
```

```
2324 LINE (J,4)-(J,K)
2326 NEXT I
2328 FOR I=0 TO N7+1
2330 K=4+I*20
2332 LINE (3,K)-(J,K)
2334 NEXT I
2336 REM === КОММЕНТАРИЙ ===
2338 LOCATE 0,(N7+1)*2+1
2340 PRINT ''ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА В ВЕТВИ''
2342 PRINT ''СОВПАДАЕТ С НАПРАВЛЕНИЕМ ОТ УЗЛА1 К УЗЛУ2''
2344 PRINT TAB(29);''ВИДЫ РЕЖИМОВ:И-ИСКЛЮЧЕНИЕ СТРОКИ''
2346 PRINT TAB(43);''З-ЗАВЕРШЕНИЕ ВВОДА''
2348 PRINT ''ИСПОЛЬЗУЙТЕ КЛАВИШИ С ИЗОБРАЖЕНИЕМ СТРЕЛОК,''
2350 PRINT ''НАПРАВЛЕННЫХ ВВЕРХ И ВНИЗ.''
2352 RETURN
2370 REM === ЧИСЛА ===
2380 IF N9>N1 THEN N9=N1
2382 IF N9<=0 THEN N9=1
2384 FOR I=0 TO N7-1
2386 K=N9+I
2388 L=I*2+3
2390 FOR J=1 TO 6
2392 LOCATE N(J),L
2394 PRINT STRING$(N(J+1)-N(J)-1,'' '')
2396 NEXT J
2398 IF K>N1 THEN 2412
2400 GOSUB 2420
2402 FOR J=1 TO 6
2404 N!=H(J)
2406 LOCATE N(J),L
2408 IF J<4 OR N!><0 THEN PRINT N!
2410 NEXT J
2412 NEXT I
2420 REM === ЗАПОЛНЕНИЕ МАССИВА H ===
2430 H(1)=K
2432 H(2)=FNK(K)
2434 H(3)=FNL(K)
2436 FOR J=2 TO 4
2438 H(J+2)=P(K,J)
2440 NEXT J
2442 IF MID$(N$(4),5,1)=''R'' THEN RETURN
2444 GOTO 1750
```

Она состоит из блоков, функции блоков приведены далее.

В строках 2000–2060 задаются начальные значения некоторым переменным и массивам. Как и раньше, вся вводимая пользователем информация хранится в двухмерном массиве P, который должен быть описан в ГП:

(номер строки) DIM P(N, 4)

где N – число ветвей схемы. Последнее также должно быть задано в ГП (до вызова ПП 2000). Например, для схемы со 100 ветвями следует написать

(номер строки) LET N= 100

В массиве P, как и прежде, в первом столбце хранятся попарно упакованные номера узлов, во втором столбце – сопротивления ветвей, а в третьем и четвертом столбцах записываются номиналы источников тока и ЭДС.

ПП 2300, очистив экран дисплея, рисует вертикальные и горизонтальные прямые, образующие таблицу, заполняет первую строку наименованиями заголовков столбцов, выводит в свободной нижней части экрана краткие пояснения о правилах работы пользователя с таблицей.

ПП 2380 отображает содержимое массива P в клетках таблицы. Строки 2120–2200 обеспечивают ввод числовой информации в массив P с клавиатуры. Две сервисные ПП 2202 и ПП 2230 предназначены для определения числа узлов и исключения лишних строк.

При работе с ПП 2000 пользователь, имеющий перед собой изображение таблицы, вводит числа в те клетки ее, где находится курсор. Признаком окончания ввода числа является нажатие клавиши ВК, после чего курсор перескакивает в следующую клетку. После заполнения последней строки таблицы происходит автоматическая смена кадра: выводятся последняя заполненная строка и шесть следующих пустых строк.

Ввод данных завершается нажатием клавиши "русское З". Это признак завершения работы всей ПП 2000. Однако при вводе постоянно возникает необходимость исправления ошибок, поэтому сначала надо просмотреть и проверить данные, скорректировать их и только потом завершать работу.

ПП 2000 выводит на экран лишь семь строк таблицы. Для полного ее просмотра нужно подвести курсор к последней строке и нажать клавишу "стрелка вниз", что приведет к отображению следующих шести строк вместе с последней (строки № 7–13) и т. д. А для того чтобы "листать" таблицу вверх, нужно подвести курсор к верхней строке и нажать клавишу "стрелка вверх".

Корректировка данных осуществляется следующим образом. Нажав несколько раз клавишу ВК, переместить курсор в крайний ле-

вый столбец. Далее с помощью клавиш со стрелками вверх и вниз переместить его по вертикали до строки, где следует внести изменения. И снова переместить курсор по горизонтали (нажимая ВК) до нужной клетки, внести правильное число и нажать клавишу ВК.

Для исключения целой строки следует установить курсор в левой крайней клетке удаляемой строки и нажать клавишу "русское И".

При включении ПП 2000 в одну из программ МКТ1, МКТ2, МУП1 или МУП2 необходимо предусмотреть заполнение массива U, в который нужно переслать данные из третьего столбца массива P (для МУП)

```
2500 FOR K = 1 TO N1
2520 U(K) = P(K, 3)
2520 NEXT K
2530 RETURN
```

или из четвертого столбца массива P (для метода УП):

```
2500 FOR K = 1 TO N1
2510 U(K) = P(K, 4)
2520 NEXT K
2540 RETURN
```

▼ Далее опишем ПП 1700, которая позволяет выводить результаты расчета (также на постоянном токе) с использованием "электронной таблицы".

```
1690 REM ************************************
1691 REM * ПП ВЫВОДА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА    *
1692 REM * НА ЭКРАН ДИСПЛЕЯ                 *
1693 REM ************************************
1700 DIM N$(3)
1702 FOR I=4 TO 6
1704 N$(I-3)=N$(I)
1706 NEXT I
1708 N$(3)="    U1(B)"
1710 N$(4)="    U2(B)"
1712 N$(5)="    I(A)"
1714 GOSUB 2300
1716 LOCATE 0,(N7+1)*2+3
1718 PRINT STRING$(33," ")
1720 N9=1
1722 GOSUB 2380
1724 N$=INKEY$
1726 IF N$="" THEN 1724
```

```
1728 IF Nв=''3'' THEN 1738
1730 J=ASC(Nв)
1732 IF NOT(J=26 OR J=27) THEN 1724
1734 N9=N9+SGN(J-26.5)*N7
1736 GOTO 1722
1738 FOR I=4 TO 6
1740 Nв(I)=Hв(I-3)
1742 NEXT I
1744 RETURN
1750 REM === ЗАПОЛНЕНИЕ МАССИВА H ===
1752 H(4)=0
1754 IF H(2)>0 THEN H(4)=A(H(2),N3)
1756 H(5)=0
1758 IF H(3)>0 THEN H(5)=A(H(3),N3)
1760 H(6)=0
1762 IF P(K,2)=0 THEN 1766
1764 H(6)=(H(4)-H(5)+P(K,4))/P(K,2)+P(K,3)
1766 RETURN
```

Вначале она вычерчивает таблицу и записывает заголовки. Затем в каждой строке заполняются клетки: номер ветви, номера узлов (во втором и третьем столбцах), потенциалы узлов и ток ветви (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Ветвь	Узел 1	Узел 2	U1[B]	U2[B]	I[A]
7	12	5	−3.15E−3	5.173E01	2.5
...	...	...	...	...	...

В нижней части экрана выводятся краткие пояснения по использованию таблицы. В тексте программы используются описанные выше ПП 2300 и ПП 2380. Программа выводит семь строк таблицы, начиная с первой. Если требуется просмотреть ее дальше, то нужно нажать клавишу "стрелка вниз", тогда кадр сменится и появятся строки с седьмой по тринадцатую и т. д. Таблицу можно "листать" (т. е. менять кадры) и в обратном порядке, нажимая клавишу "стрелка вверх". Просмотр таблицы завершается нажатием клавиши "русское З".

Приведенный текст ПП 1700 предназначен для расчетов по методу УП. Если же используется метод КТ, то строки 1752–1766 следует

заменить на иные:

```
1750 REM ЗАПОЛНЕНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО МАССИВА H
1752  LET H(4) = 0
1754 IF H(2) > 0 THEN H(4) = U(H(2))
1756 H(5) = 0
1758 IF H(3) = 0  THEN H(5) = U(H(5))
1760 LET H(6) = Z(K)
1762 RETURN
```

Кроме того, в текст программ МКТ1 или МКТ2 следует добавить следующий фрагмент для вычисления потенциалов узлов по токам:

```
1417 REM x x x x x x x x x x x x x x x x x x x x x
1418 REM ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ УЗЛОВ x
1419 REM x x x x x x x x x x x x x x x x x x x x x
1420 FOR  I = 1 TO N2
1422  P(I, 1) = –P(I, 1)
1424  NEXT  I
1426 FOR I = 1 TO N2
1428  IF P(I, 1) > 0 THEN 1456
1430  FOR J = 1 TO N1
1432  IF (FNA(J) –I) * (FNB(J)–I) < > 0 THEN 1454
1434  K = FNA(J) + FNB(J)–I
1436   L = 0
1438   IF K = 0 THEN 1442
1440   L = U(K)
1442   M= 1
1444   IF FNA(J) = I THEN 1448
1446   M = –1
1448  U(I) = L–M * ((Z(J) – P(J, 3)) * P(J, 2) – P(J, 4))
1450  P(I, 1) = –P(I, 1)
1452  GOTO 1456
1454   NEXT J
1456  NEXT I
1458  FOR I = 1 TO N2
1460  IF P(I, 1) < 0 THEN 1426
1462  NEXT I
```

Обычно ПП 2000 и ПП 1700 используются совместно. В случае, когда ПП 1700 пользователю не нужна, следует исключить в тексте ПП 2000 строку 2444.

▼ Опишем далее две простые программы, которые можно реализовать на ПЭВМ, не имеющей графических средств языка БЕЙСИК.

ПП 7210 предназначена для печати графика (под словом "печать" понимается здесь как вывод информации на печатающее устройство, так и отображение ее на экране). Исходными данными служат M0 – номер функции (номер строки, в которой она размещена), M1 и M2 – номера первого и последнего значений функции, M3 – ключ (при M3=1 изображается ось абсцисс, при M3=2 ее нет), M4, M5 и M6 – соответственно ширина зоны номеров точек, числовых значений и графика.

```
7200  REM ********************************
7202  REM * ПЕЧАТЬ ГРАФИКА ОДНОЙ ФУНКЦИИ *
7204  REM ********************************
7210  LET M7=M0
7212  LET M8=M1
7214  REM GOSUB <ВЫЧИСЛЕНИЕ ФУНКЦИИ>
7216  LET L8=M9
7218  LET L9=M9
7220  FOR M8=M1+1 TO M2
7222  REM GOSUB <ВЫЧИСЛЕНИЕ ФУНКЦИИ>
7224  IF M9 <= L8 THEN 7230
7226  LET L8=M9
7228  GOTO 7234
7230  IF M9 >= L9 THEN 7234
7232  LET L9=M9
7234  NEXT M8
7236  LET L7=2-M3
7238  LET L1=L8*SGN(1+SGN(L8)*L7)
7240  LET L2=L9*SGN(1-SGN(L9)*L7)
7242  LET L3=(L1-L2)/(M6-1+SGN(1-SGN(M6-1)))
7244  IF L3>0 THEN 7250
7246  PRINT "ГРАФИК ФУНКЦИИ - ПРЯМАЯ Y(X)=";L1
7248  RETURN
7250  LET L0=M4+M5+2
7252  LET L4=INT(-L2/L3+1.5)+L0
7254  GOSUB 7288
7256  FOR M8=M1 TO M2
7258  REM GOSUB <ВЫЧИСЛЕНИЕ ФУНКЦИИ>
7260  LET L5=INT((M9-L2)/L3+1.5)+L0
7262  IF (M3-2)*(L4-L5)=0 THEN 7274
7264  IF L4>L5 THEN 7270
7266  PRINT M8;TAB(M4);M9;TAB(L0);"I";TAB(L4);".";TAB(L5);"*"
7268  GOTO 7276
```

```
7270  PRINT M8;TAB(M4);M9;TAB(LO);"I";TAB(L5);"*";TAB(L4);"."
7272  GOTO 7276
7274  PRINT M8;TAB(M4);M9;TAB(LO);"I";TAB(L5);"*"
7276  NEXT M8
7278  GOSUB 7288
7280  PRINT "Y(MAX)=";L8,"Y(MIN)=";L9
7282  PRINT "DY=";L3
7284  GOSUB 7288
7286  RETURN
7288  PRINT "----------------------------------------"
7290  RETURN
```

До начала работы в строки 7214, 7222 и 7258 нужно внести изменения в зависимости от того, как передаются значения функции в ПП. Наиболее простой способ передачи – запись значений функции в некоторый массив X. Пусть, например, в строках 1, 2, 3 этого массива расположены три разные функции U_a , U_b и U_c, а печатать следует U_c с 10-го по 70-й элемент. Тогда присвоим M0=3, M1=10 и M2=70, а в перечисленных строках запишем

LET M9 = X(M7, M8)

Можно также непосредственно вычислять значения функции, что целесообразно при ее достаточно простом виде. Строки 7214, 7222 и 7258 нужно записать в виде

LET M0 = FNA (M8)

где функция должна быть описана в ГП с помощью оператора DEF. В качестве примера последней ниже проведен текст, в котором все исходные данные вводятся в диалоге.

```
3000  REM ****************************
3002  REM * ТЕСТ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПП 7210 *
3004  REM ****************************
3010  DIM M[3,100]
3020  PRINT "ПП 7210 ПОДГОТОВЛЕНА К РАБОТЕ (1-ДА,0-НЕТ) ?"
3030  INPUT W
3040  IF W=1 THEN 3090
3050  PRINT "ВСТАВЬТЕ В ПП 7210 ПОД НОМЕРАМИ 7215,"
3060  PRINT "7223 И 7259 ОПЕРАТОР '<N> LET M9=M(M7,M8)' "
3070  PRINT "И СНОВА ПЕРЕЗАПУСТИТЕ ПРОГРАММУ."
3080  STOP
3090  PRINT "ПОДГОТОВКА СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА,"
```

```
3100  PRINT "ВВЕДИТЕ ЕГО ПАРАМЕТРЫ: АМПЛИТУДУ, ПОСТОЯННУЮ"
3110  PRINT "СОСТАВЛЯЮЩУЮ, ФАЗУ (В ГРАД.),ПЕРИОД, ШАГ"
3120  PRINT "КВАНТОВАНИЯ ПО ВРЕМЕНИ И ЧИСЛО ТОЧЕК."
3130  PRINT "A,B,F,T,H,N=";
3140  INPUT A,B,F,T,H,N
3150  PRINT "В КАКОЙ СТОЛБЕЦ МАССИВА M ЗАНЕСТИ ЗНАЧЕНИЯ"
3160  PRINT "СИНУСА ?"
3170  INPUT M0
3180  PRINT "УКАЖИТЕ ПЕРВУЮ И ПОСЛЕДНЮЮ ТОЧКИ ГРАФИКА ."
3190  INPUT M1,M2
3200  PRINT "НУЛЕВУЮ ЛИНИЮ (ОСЬ АБСЦИСС) ПЕЧАТАТЬ "
3210  PRINT "(1-ДА,0-НЕТ) ?"
3220  INPUT M3
3230  LET M3=2-M3
3240  PRINT "ЗАДАЙТЕ ШИРИНУ ЗОНЫ НОМЕРОВ ТОЧЕК, ЗОНЫ"
3250  PRINT "ЗНАЧЕНИЙ ФУНКЦИИ И ЗОНЫ ГРАФИКА."
3260  INPUT M4,M5,M6
3270  LET P=3.14159
3280  LET F0=F*P/180
3290  LET H0=2*P*H/T
3300  FOR I=1 TO N
3310  LET M[M0,I]=A*SIN(F0)+B
3320  LET F0=F0+H0
3330  NEXT I
3340  GOSUB 7210
3350  STOP
```

Протокол работы этой программы приведен далее.

```
RUN

ПП 7710 НАСТРОЕНА ДЛЯ РАБОТЫ (1-ДА,0-НЕТ) ?
?1

ПОДГОТОВКА СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА,
ВВЕДИТЕ ЕГО ПАРАМЕТРЫ: АМПЛИТУДУ, ПОСТОЯННУЮ
СОСТАВЛЯЮЩУЮ, ФАЗУ (В ГРАД.),ПЕРИОД, ШАГ
КВАНТОВАНИЯ ПО ВРЕМЕНИ И ЧИСЛО ТОЧЕК.
A,B,F,T,H,N=?1,0,0,20,1,100

В КАКОЙ СТОЛБЕЦ МАССИВА M ЗАНЕСТИ ЗНАЧЕНИЯ
СИНУСА ?
?3

УКАЖИТЕ ПЕРВУЮ И ПОСЛЕДНЮЮ ТОЧКИ ГРАФИКА .
?30,53
```

```
НУЛЕВУЮ ЛИНИЮ (ОСЬ АБСЦИСС) ПЕЧАТАТЬ
(1-ДА,0-НЕТ) ?
?1

ЗАДАЙТЕ ШИРИНУ ЗОНЫ НОМЕРОВ ТОЧЕК, ЗОНЫ
ЗНАЧЕНИЙ ФУНКЦИИ И ЗОНЫ ГРАФИКА.
?7,15,35

-----------------------------------
 30     .309018          I                  .       *
 31     1.49803E-06      I                  .*
 32    -.309015          I             *    .
 33    -.587785          I         *        .
 34    -.809016          I     *            .
 35    -.951056          I  *               .
 36    -1.               I*                 .
 37    -.951056          I  *               .
 38    -.809017          I     *            .
 39    -.587786          I         *        .
 40    -.309017          I             *    .
 41     0                I                  .*
 42     .309018          I                  .       *
 43     .587785          I                  .           *
 44     .809017          I                  .               *
 45     .951057          I                  .                *
 46     1.               I                  .                 *
 47     .951056          I                  .                *
 48     .809016          I                  .               *
 49     .587785          I                  .           *
 50     .309015          I                  .       *
 51     0                I                  .*
 52    -.309018          I             *    .
 53    -.587785          I         *        .
-----------------------------------
Y(MAX)= 1.                    Y(MIN)=-1.
DY= 5.71429E-02
-----------------------------------

READY
```

▼ Другая ПП 7510 позволяет выводить годограф комплекснозначной функции (например, изображать изменение действительной и мнимой частей комплексного сопротивления цепи в зависимости от частоты). До обращения к ней нужно в строках двухмерного массива X указать координаты точек: в первом столбце — значения абсцисс, во втором — ординаты точек. Количество точек предварительно заносится в К1, а размеры графика по горизонтали и вертикали — в К2 и К3 (выраженные числом символов). В процессе работы ПП производится переупорядочивание координат, что ускоряет работы ПП. Однако иногда следует сохранить первоначальный порядок следования координат в массиве X. Для этого служит ключ К4: при К4=1 первоначальный порядок восстанавливается, при К4=0 не восстанавливается.

Помимо массива X размерностью K1 x 3 (третий столбец нужен для хранения номеров переставляемых величин) в ПП используется вспомогательный массив K размерностью 10 + K2. Оба массива X и K должны быть описаны в ГП.

```
7500  REM ***************************************
7502  REM * ПЕЧАТЬ ГОДОГРАФА КОМПЛЕКСНОЗНАЧНОЙ *
7504  REM * ФУНКЦИИ .                           *
7506  REM ***************************************
7510  LET K9=K1+1
7512  LET K[1]=X[1,1]
7514  LET K[2]=K[1]
7516  LET K[4]=X[1,2]
7518  LET K[5]=K[4]
7520  FOR KO=1 TO K1
7522  FOR K=1 TO 2
7524  LET K7=X[KO,K]
7526  IF K[3*K-2] >= K7 THEN 7530
7528  LET K[3*K-2]=K7
7530  IF K[3*K-1] <= K7 THEN 7534
7532  LET K[3*K-1]=K7
7534  NEXT K
7536  IF K4=0 THEN 7540
7538  LET X[KO,3]=K1-KO
7540  NEXT KO
7542  LET K[3]=(K[1]-K[2])/(K2-1)
7544  LET K[6]=(K[4]-K[5])/(K3-1)
7546  LET K9=SGN(K[3])*SGN(K[6])
7548  IF K9>0 THEN 7570
7550  LET K9=K[3]+K[6]
7552  IF K9>0 THEN 7558
7554  PRINT "ГОДОГРАФ - ТОЧКА С КООРДИНАТАМИ : ";K[1];K[2]
7556  RETURN
7558  PRINT "ТОЧКИ ГОДОГРАФА ПРИНАДЛЕЖАТ";
7560  IF K[6]=0 THEN 7566
7562  PRINT "ПРЯМОЙ Y(X)=";K[1]
7564  RETURN
7566  PRINT "ПРЯМОЙ X(Y)=";K[4]
7568  RETURN
7570  LET K9=2
7572  GOSUB 7684
```

```
7574  PRINT "Y(MAX)=";K[4];TAB(25);"Y(MIN)=";K[5]
7576  PRINT "X(MAX)=";K[1];TAB(25);"X(MIN)=";K[2]
7578  PRINT "DY=";K[6];TAB(25);"DX=";K[3]
7580  GOSUB 7672
7582  LET K[7]=INT(-K[2]/K[3]+1.5)
7584  IF SGN(K[7]-K[1])*SGN(K[7]-K[2])>0 THEN 7588
7586  LET K[7]=0
7588  LET K[8]=INT(K[4]/K[6]+1.5)
7590  IF SGN(K[8]-K[4])*SGN(K[8]-K[5])>0 THEN 7594
7592  LET K[8]=0
7594  LET K9=1
7596  FOR K=1 TO K3
7598  LET K8=SGN(ABS(K-K[8]))
7600  FOR K0=1 TO K2
7602  LET K[10+K0]=1
7604  NEXT K0
7606  IF K9>K1 THEN 7618
7608  IF INT((K[4]-X[K9,2])/K[6]+1.5)>K THEN 7618
7610  LET K7=10+INT((X[K9,1]-K[2])/K[3]+1.5)
7612  LET K[K7]=K[K7]+1
7614  LET K9=K9+1
7616  GOTO 7606
7618  IF K[7]=0 THEN 7624
7620  IF K[10+K[7]]>1 THEN 7624
7622  LET K[10+K[7]]=0
7624  PRINT "I";
7626  FOR K0=1 TO K2
7628  LET K7=K[10+K0]
7630  IF K7>0 THEN 7636
7632  PRINT ".";
7634  GOTO 7656
7636  IF K7>1 THEN 7648
7638  IF K8=0 THEN 7644
7640  PRINT " ";
7642  GOTO 7656
7644  PRINT ".";
7646  GOTO 7656
7648  IF K7>2 THEN 7654
7650  PRINT "+";
7652  GOTO 7656
7654  PRINT "*";
```

```
7656  NEXT K0
7658  PRINT "I"
7660  NEXT K
7662  GOSUB 7672
7664  IF K4=0 THEN 7670
7666  LET K9=3
7668  GOSUB 7684
7670  RETURN
7672  PRINT "I";
7674  FOR K=1 TO K2
7676  PRINT "-";
7678  NEXT K
7680  PRINT "I"
7682  RETURN
7684  LET K0=0
7686  GOTO 7706
7688  IF X[K,K9]>X[K+1,K9] THEN 7706
7690  FOR K8=1 TO 2+K4
7692  LET K7=X[K,K8]
7694  LET X[K,K8]=X[K+1,K8]
7696  LET X[K+1,K8]=K7
7698  NEXT K8
7700  IF K=1 THEN 7706
7702  LET K=K-1
7704  GOTO 7688
7706  LET K0=K0+1
7708  LET K=K0
7710  IF K<K1 THEN 7688
7712  RETURN
```

Приложение 1. **Пример расчета длинных линий**

Приведем пример вычисления вторичных параметров длинной линии по первичным при заданной частоте с помощью подпрограмм, описанных в § 3.5.

Составим головную программу

```
100 DIM Z(10, 3), K(10)
110 LET K(1) = 1
120 LET K(2) = 8
130 LET K(3) = 4
140 PRINT "ВВЕДИТЕ ЧЕРЕЗ ЗАПЯТУЮ УДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ"
```

```
150 PRINT "ЛИНИИ: R0 (0M/KM), L0(ГН/КМ), G0(СМ/КМ)"
160 PRINT "И C0 (Ф/КМ)"
170 INPUT Z(K(I), 1), Z(K(1), 2), Z(K(1) + 1, 1), Z(K(1) + 1, 2)
180 PRINT "УКАЖИТЕ ЧАСТОТУ В ГЦ)"
190 INPUT F
200 G0 SUB 4600
210 PRINT "B="; Z(K(2), 1);" + J*"; Z(K(2), 2): "OM"
220 PRINT "C="; Z(K(2) + 1, 1); "+ J*"; Z(K(2) + 1, 2): "1/KM
230 STOP
```

В ней в строках 110–130 указаны номера строк массива Z, в которых должны храниться исходные данные и результаты. Затем (строки 140–190) в диалоге вводятся данные. После вызова ПП 4600 на экране отображаются результаты расчета.

Протокол одного расчета приведен ниже.

```
RUN
ВВЕДИТЕ ЧЕРЕЗ ЗАПЯТУЮ УДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ЛИНИИ R0(0M/KM), L0(ГН/КМ), G0(СМ/КМ)
И C0 (Ф/КМ)
? 6.5, 2.29E–3, .5E–6,5.22E–9
УКАЖИТЕ ЧАСТОТУ В ГЦ
?1000
B = 6.78159E–2 + J* 1.45318E–2 OM
C = 4.9198E–3 + J* 2.18998E–2 1/KM
```

Приложение 2. Программа "Комплексный калькулятор"

Приведенными в данной книге программами охватывается лишь небольшая часть вычислительных задач в электротехнике. Как быть в остальных случаях? Можно надеяться, что программа, позволяющая оперировать с комплексными числами (С-числами) так, как это осуществляется в обычных непрограммируемых микрокалькуляторах, может найти свое применение при решении других задач. Кроме того, она может оказаться полезной при обучении методике расчетов.

Одним из возможных вариантов "Комплексного калькулятора" (КК) реализованного на подмножестве языка БЕЙСИК, который описан в гл. 1, может быть программа КК, которая имитирует действия пользователя при работе на обычном непрограммируемом калькуляторе с действительными числами.

Программа КК выполняет следующие процедуры:

а) простые операции с С-числами (сложение, вычитание, умножение, деление и возведение в степень);

б) вычисление модуля и аргумента, а также экспоненты и логарифмы С-чисел;

в) вычисление гиперболических функций;

г) запоминание и считывание информации из регистров памяти.

КК содержит ряд элементарных ПП, комбинации которых обеспечивают выполнение перечисленных выше процедур. В отличие от ПП, описанных в гл. 5, здесь в каждой ПП не только находится результат вычислений, но и проверяется его принадлежность допустимому множеству решений. Например, если при делении одного числа на другое результат по абсолютной величине превышает верхнюю границу представляемых в КК чисел (если делитель много меньше делимого) и возникает ситуация, аналогичная делению на нуль, то вместо чисел на экране выводится сообщение "ERROR", вычисления прерываются и затем пользователю предлагается снова ввести код операции.

В том случае, когда результат вычисления в какой-либо ПП по абсолютной величине много меньше единицы и не равен нулю (т. е. не представим на "индикаторе калькулятора"), то производится округление его до нуля и вычисления продолжаются. Таким образом, в отличие от интерпретатора языка БЕЙСИК осуществляется (моделируется) одна из функций калькулятора – проверка результата на переполнение. Кроме того, использование элементарных ПП позволяет избежать ненужного дублирования операций и существенно сократить текст КК.

Каждая элементарная операция кодируется четырехзначным числом. В нем не только содержится информация о номере вызываемой ПП, но и указывается месторасположение операндов и результата вычислений. Списки кодов приведены в строках 210–240 программы (см. ее текст). Строки 300–512 организуют загрузку констант при работе – в массив N вводятся коды, задаются числовые константы (π, e и верхняя граница используемых в КК чисел).

Строки 1000–1092 организуют взаимодействие пользователя с программой. Диалог организован очень кратко и может быть развернут и дополнен выводом звуковой, строковой и графической информации для того, чтобы улучшить комфортабельность программы.

В строках 3000–3142 коды расшифровываются и вызываются нужные ПП, размещенные в строках 3200–3588.

В целом структура программы КК является "открытой", т. е. позволяет легко изменять ее текст, дает возможность и усовершенствовать его: а) сократить длину и время счета; б) сделать диалог более "дружественным"; в) расширить возможности программы, добавив новые процедуры.

Остановимся кратко на практической работе с КК.

Программа запускается на выполнение (т. е. калькулятор "включается") обычной в БЕЙСИКе командой RUN.

Для выполнения операций и вычислений требуется ввести следующую информацию: а) код операции и б) одно С-число (если операция

одноместная, т. е. требующая одного числа) или два С-числа (если операция двухместная).

При выполнении операций используются два комплексных "регистра" – регистр X (РХ) и регистр У (РУ). Числа при вводе заносятся в РХ, а из него можно записать число в РУ. Результат вычислений всегда помещается в регистр X. Кроме того, для сохранения и последующего использования промежуточных результатов предусмотрено еще 99 "регистров памяти", в которые можно заносить С-числа из РХ, считывать из них информацию, пересылая ее в РХ, и производить обмен информацией между любыми из этих регистров. (Все они предназначены для хранения С-чисел.)

Программа КК работает в режиме диалога. После ее запуска на экране дисплея появляется запрос:

КОД ОПЕРАЦИИ (0 – ВЫЗОВ МЕНЮ) = ?

В ответ пользователь выбирает одну из допустимых операций и вводит ее код с клавиатуры. Если пользователь не помнит код, то вводит в ответ 0 и получает на экране меню – перечень всех операций КК и соответствующие коды в виде следующей таблицы.

Код	Операция	Код	Операция	Код	Операция
–2	КОНЕЦ	–1	PN – >PM	0	МЕНЮ
1	С – >РХ	2	РХ – >РУ	3	РХ + РУ
4	РУ–РХ	5	РУ *РУ	6	РУ/РХ
7	РХ↑ РХ	8	(MOD, APG)	9	(RE, IM)
10	EXP	11	LOG	12	SH
13	CH	14	TH	15	ARC TH

Поясним обозначения в тексте таблицы.

"КОНЕЦ" означает "Выключение калькулятора", т. е. завершение работы программы КК.

PN – > PM означает пересылку содержимого регистра PN в PM (регистр с номером M), "МЕНЮ" – вывод приведенной выше таблицы на экран дисплея, С – > РХ означает ввод С-числа в регистр X, а РХ – > РУ – пересылку из РХ в РУ. РХ + РУ означает сложение комплексных чисел: к содержимому регистра У прибавляется содержимое регистра X. Аналогично этому обозначены и следующие четыре операции. Следует обратить внимание на то, что при вычитании, делении и возведении в степень сначала надо ввести вычитаемое, делимое и показатель степени и поместить их в регистр У. РХ ↑ РУ означает возведение числа из регистра X в степень, показатель которой находится в РУ. Если на данной ПЭВМ степень обозначается иным символом, то целесообразно заменить его в строке 1610 теста программы.

(MOD, ARG) означает, что для С-числа находится модуль и аргумент, а (RE, IM) соответствует обратному преобразованию. Остальные функции обозначены обычной математической нотацией (LOG – натуральный логарифм).

Ввод С-числа в КК осуществляется следующим образом. На приведенный выше запрос вводится код операции, равный 1. На экране появляется запрос-подсказка, в каком порядке вводить компоненты С-числа:

RE(X), IM(X) =

Это означает, что сначала следует ввести действительную часть, а затем и мнимую компоненту С-числа, отделив ее запятой.

Приведем пример выполнения операции сложения двух комплексных чисел. Надо найти $Z = Z1 + Z2$, где $Z1 = 1 + j2$ и $Z2 = 3 + j4$. Сначала в ответ на запрос о коде операции отвечаем 1 и вводим 1 и 2 (части первого числа). Это число следует переслать из РХ в РУ. Затем вводится в РХ второе число и код операции сложения. На экране появляется ответ. Эти действия изобразим в виде небольшой таблицы.

Сообщение или запрос ЭВМ	Ответ пользователя
1 КОД =	1
2 RE(X), IM(X) =	1,2
3 КОД =	2
4 КОД =	1
5 RE(X), IM(X) =	3,4
6 КОД =	3
7 RE(X) = 4, IM(X) = 6	–

Аналогичные действия совершаются и при выполнении других операций.

Как отмечалось ранее, в основу построения диалога в программе КК положена аналогия с действиями пользователя с непрограммируемым микрокалькулятором. Эта идея представляется плодотворной для построения различных диалоговых систем программ прикладного характера. На ее основе могут быть, например, построены такие диалоговые программы, как "Матричный калькулятор", "Алгебраический калькулятор", "Калькулятор-интегратор" и "Электрический калькулятор".

```
1 REM ***********************************
2 REM * КОМПЛЕКСНЫЙ КАЛЬКУЛЯТОР        *
3 REM ***********************************
10 DIM N(20,3),L(150),P(10),Z(101,2)
100 REM ---ГРАНИЦЫ---
110 DATA 3,2,4,4,5,11,6,24,8,31,9,40
```

```
112 DATA 10,45,11,51,12,67,13,83,14,102
114 DATA 15,123,7,140,0,0
200 REM ---КОДЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ОПЕРАЦИЙ---
210 DATA 1313,2423,1134,2244,5315,6425,5654,6145,1058
212 DATA 5235,2563,5115,6225,7563,2022,5315,6425,5654
214 DATA 6145,1058,5235,2563,1716,2726,5115,6225,5563
216 DATA -2125,1051,3018,-4027,-5021,-6022,2515,1615,-4046
218 DATA -5041,-6042,4535,3635,-5021,-6022,-7018,1765,2755
220 DATA 5115,6225,5563,5051,-2125,-1059,-5021,-6022,-7018
222 DATA 3765,4755,1012,2022,-5021,-6022,-7018,1765,2755
224 DATA 1134,2244,1019,2029,-5021,-6022,-7018,3765,4755
226 DATA 1012,2022,-5021,-6022,-7018,1765,2755,1133,2243
228 DATA 1019,2029,1113,2223,-5021,-6022,-7018,1765,2755
230 DATA 4114,-3048,1313,1019,2029,5115,6225,5563,2526
232 DATA 1516,1134,1018,4114,-3048,7333,1314,5115,6225
234 DATA 5653,1516,2526,1715,2725,1313,1012,5115,6225
236 DATA 5563,5051,-5059,-6125,1059,2069,5115,6225,7563
238 DATA 5071,-2125,-1059,5315,6425,7654,5415,6325,8563
240 DATA -7078,-5081,-6082,2575,1675
300 REM ---КОНСТАНТЫ: D=MAX,C1='ПИ',C2='E'---
310 LET D=1E+10
320 LET C1=3.1415926
330 LET C2=2.71828
400 REM ---НАСТРОЙКА ПРОГРАММЫ (ЗАПОЛНЕНИЕ МАССИВОВ)---
410 FOR I=1 TO 100
412 READ N(I,1),N(I,3)
414 IF N(I,3)=0 THEN 420
416 LET N(I+1,2)=N(I,3)+1
418 NEXT I
420 LET N(1,2)=1
422 LET M=I-1
424 FOR I=1 TO N(M,3)
426 READ L(I)
428 NEXT I
500 FOR I=1 TO 101
502 LET Z(I,1)=0
504 LET Z(I,2)=0
506 NEXT I
510 GOSUB 1000
512 STOP
1000 REM ---ВВОД ДАННЫХ В РЕЖИМЕ ДИАЛОГА---
```

```
1010 PRINT "КОД (0-ВЫЗОВ МЕНЮ) = ";
1012 INPUT K
1013 LET G3=K
1014 IF K<>0 THEN 1020
1016 GOSUB 1500
1018 GOTO 1010
1020 IF K=-2 THEN 1092
1022 IF K>0 THEN 1036
1024 PRINT "РЯ->РМ: N,M= ";
1026 INPUT K1,K2
1028 FOR I=1 TO 2
1030 LET Z(K2+1,I)=Z(K1+1,I)
1032 NEXT I
1034 GOTO 1088
1036 IF K>1 THEN 1044
1038 PRINT "RE(X),IM(X)= ";
1040 INPUT Z(1,1),Z(1,2)
1042 GOTO 1010
1044 IF K>2 THEN 1052
1046 LET K1=0
1048 LET K2=1
1050 GOTO 1028
1052 LET Y1=Z(2,1)
1054 LET Y2=Z(2,2)
1056 FOR I0=1 TO M
1058 IF K=ABS(N(I0,1)) THEN 1064
1060 NEXT I0
1062 GOTO 1016
1064 LET G1=N(I0,2)
1066 LET G2=N(I0,3)
1067 LET G3=K
1068 FOR G=G1 TO G2
1070 LET K=L(G)
1072 GOSUB 3000
1074 IF E<1 THEN 1080
1076 PRINT " ERROR "
1078 GOTO 1082
1080 NEXT G
1081 IF (G3-8)*(G3-9)=0 THEN 1086
1082 LET Z(2,1)=Y1
1084 LET Z(2,2)=Y2
```

```
1086 IF E=1 THEN 1010
1088 PRINT "R(X)= ";Z(1,1)," IM(X)= ";Z(1,2)
1089 IF ABS(G3-8)*ABS(G3-9)<>0 THEN 1010
1090 PRINT " RE(Y)= ";Z(2,1)," IM(Y)= ";Z(2,2)
1091 GOTO 1010
1092 RETURN
1500 REM ---МЕНЮ (СПИСОК ОПЕРАЦИЙ И ИХ КОДОВ)---
1510 FOR K=1 TO 3
1520 PRINT TAB(1+(K-1)*20);" КОД   ОПЕРАЦИЯ ";
1530 NEXT K
1540 PRINT
1550 PRINT " -2    КОНЕЦ ";TAB(21);" -1    PN->PM ";
1560 PRINT TAB(41);"  0    МЕНЮ "
1570 PRINT "  1    C->PX";TAB(21);"  2    PX->PY ";
1580 PRINT TAB(41);"  3    PY+PX "
1590 PRINT " 44    PY-PX ";TAB(21);"  5    PY*PX ";
1600 PRINT TAB(41);"  6    PY/PX "
1610 PRINT "  7    PX_PY ";TAB(21);"  8    (MOD,ARG) ";
1620 PRINT TAB(41);"  9    (RE,IM) "
1630 PRINT " 10    EXP ";TAB(21);" 11    LOG ";TAB(41);
1640 PRINT " 12    SH "
1650 PRINT " 13    CH ";TAB(21);" 14    TH ";TAB(41);
1660 PRINT " 15    ARC TH "
1670 RETURN
3000 REM ---ВЫПОЛНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ОПЕРАЦИИ---
3010 LET A=SGN(K)
3012 LET K=ABS(K)
3014 FOR I=1 TO 4
3016 LET P(I)=K-INT(K/10)*10
3018 LET K=INT(K/10)
3020 NEXT I
3022 LET P(1)=P(1)*A
3024 FOR I=2 TO 3
3025 IF P(I)=0 THEN 3038
3026 IF P(I)>4 THEN 3036
3028 LET J=INT((P(I)+1)/2)
3030 LET K=P(I)-(J-1)*2
3032 LET P(I)=Z(J,K)
3034 GOTO 3038
3036 LET P(I)=P(P(I)+1-SGN(P(I)))
3038 NEXT I
```

```
3040 IF P(1)>-9 THEN 3046
3042 GOSUB 3580
3044 GOTO 3124
3046 IF P(1)>-8 THEN 3052
3048 GOSUB 3560
3050 GOTO 3124
3052 IF P(1)>-6 THEN 3058
3054 GOSUB 3530
3056 GOTO 3124
3058 IF P(1)>-5 THEN 3064
3060 GOSUB 3400
3062 GOTO 3124
3064 IF P(1)>-4 THEN 3070
3066 GOSUB 3510
3068 GOTO 3124
3070 IF P(1)>0 THEN 3076
3072 GOSUB 3470
3074 GOTO 3124
3076 IF P(1)>1 THEN 3082
3078 LET P(3)=.5
3080 GOTO 3108
3082 IF P(1)>2 THEN 3088
3084 LET P(3)=-1
3086 GOTO 3096
3088 IF P(1)>4 THEN 3096
3090 GOSUB 3210
3092 GOTO 3124
3094 IF P(1)>5 THEN 3100
3096 GOSUB 3240
3098 GOTO 3124
3100 IF P(1)>6 THEN 3106
3102 GOSUB 3270
3104 GOTO 3124
3106 IF P(1)>7 THEN 3112
3108 GOSUB 3330
3110 GOTO 3124
3112 IF P(1)>8 THEN 3118
3114 LET R=P(2)
3116 GOTO 3122
3118 LET P(3)=2
3120 GOTO 3102
```

```
3122 LET E=0
3124 IF E=1 THEN 3142
3126 IF E=0 THEN 3130
3128 LET R=0
3130 IF P(4)>4 THEN 3140
3132 LET J=INT((P(4)+1)/2)
3134 LET K=P(4)-(J-1)*2
3136 LET Z(J,K)=R
3138 RETURN
3140 LET P(P(4))=R
3142 RETURN
3200 REM---СЛОЖЕНИЕ И ВЫЧИТАНИЕ---
3210 LET E=1
3212 IF SGN(P(3))*SGN(P(2))*SGN(3.5-P(1))<=0 THEN 3216
3214 IF ABS(P(2))>D-ABS(P(3)) THEN 3220
3216 LET R=P(2)+P(3)*SGN(3.5-P(1))
3218 LET E=0
3220 RETURN
3230 REM---УМНОЖЕНИЕ---
3240 LET E=0
3242 IF SGN(P(2))*SGN(P(3))=0 THEN 3248
3244 GOSUB 3300
3246 IF E=1 THEN 3250
3248 LET R=(SGN(E+1)*P(2))*P(3)
3250 RETURN
3260 REM---ДЕЛЕНИЕ---
3270 LET E=1
3272 IF P(3)=0 THEN 3284
3274 LET E=0
3276 IF P(2)=0 THEN 3282
3278 GOSUB 3300
3280 IF E=1 THEN 3284
3282 LET R=(SGN(E+1)*P(2))/P(3)
3284 RETURN
3290 REM---ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ПП---
3300 LET C=LOG(ABS(P(2)))+LOG(ABS(P(3)))*SGN(5.5-P(1))
3302 LET E=0
3304 IF C<=LOG(D) THEN 3310
3306 LET E=1
3308 RETURN
```

```
3310 IF C>=-LOG(D) THEN 3314
3312 LET E=-1
3314 RETURN
3320 REM---ВОЗВЕДЕНИЕ В СТЕПЕНЬ---
3330 LET E=1
3332 IF P(2)<>0 THEN 3342
3334 IF P(3)<=0 THEN 3340
3336 LET E=0
3338 LET R=0
3340 RETURN
3342 LET Z=1
3344 IF P(2)>0 THEN 3348
3346 IF P(3)<>INT(P(3)) THEN 3340
3347 LET Z=SGN(.5-P(3)+INT(P(3)/2)*2)
3348 LET A=D
3350 LET D=LOG(D)
3352LET B=P(2)
3354 LET P(2)=LOG(ABS(B))
3356 LET P(1)=5
3358 GOSUB 3240
3360 LET D=A
3362 LET P(2)=B
3364 IF P(3)>0 THEN 3368
3366 LET E=-E
3368 IF E=1 THEN 3376
3370 IF E=0 THEN 3378
3372 LET E=0
3374 LET R=1
3376 RETURN
3378 LET R=Z*ABS(P(2))↑P(3)
3380 RETURN
3390 REM---ВЫЧИСЛЕНИЕ ARC TG---
3400 LET P(1)=6
3402 GOSUB 3270
3404 IF E=0 THEN 3416
3406 IF E=1 THEN 3412
3408 LET R=0
3410 GOTO 3422
3412 LET R=C1/2
3414 GOTO 3418
3416 LET R=ATN(R)
```

```
3418 IF P(2)>0 THEN 3422
3420 LET R=-R
3422 IF P(2)>=0 THEN 3426
3424 LET R=(C1-ABS(R))*SGN(SGN(R)+.5)
3426 LET E=0
3428 RETURN
3440 REM---ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УГЛОВ---
3450 LET P(1)=6
3452 LET P(3)=2*C1
3454 GOSUB 3270
3456 LET R=P(2)-INT(R)*P(3)
3458 RETURN
3460 REM---ВЫЧИСЛЕНИЕ SIN,COS,TG---
3470 LET P1=P(1)
3471 GOSUB 3450
3472 IF P1=-2 THEN 3480
3474 IF P1=-3 THEN 3484
3476 LET R=SIN(R)
3478 RETURN
3480 LET R=COS(R)
3482 RETURN
3484 LET P(1)=6
3486 LET P(2)=SIN(R)
3488 LET P(3)=COS(R)
3490 GOSUB 3270
3492 RETURN
3500 REMВЫЧИСЛЕНИЕ      ATN---
3510 LET E=0
3512 LET R=ATN(P(2))
3514 RETURN
3520 REM---ГРАД.<--->РАД.---
3530 LET A=P(1)
3532 LET P(1)=6
3534 LET P(3)=180*SGN(7+A)+C1*SGN(A+6)
3536 GOSUB 3270
3538 LET P(1)=5
3540 LET P(2)=R
3542 LET P(3)=C1*SGN(7+A)+180*SGN(A+6)
3544 GOSUB 3240
3546 RETURN
3550 REM---ВЫЧИСЛЕНИЕ EXP---
```

```
3560 LET P(1)=7
3562 LET P(3)=P(2)
3564 LET P(2)=C2
3566 GOSUB 3330
3568 RETURN
3570 REM---ВЫЧИСЛЕНИЕ LOG---
3580 LET E=1
3582 IF P(2)<=0 THEN 3588
3584 LET E=0
3586 LET R=LOG(P(2))
3588 RETURN
9999 END
```

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кетков Ю. Л.** Программирование на БЕЙСИКе. М.: Статистика, 1978.
2. **Уорт Т.** Программирование на языке БЕЙСИК. Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1981.
3. **Программирование** на БЕЙСИК–ПЛЮС для СМ-4/ В. П. Семик, Б. Р. Моисибович, Д. П. Непочатых и др. М.: Финансы и статистика, 1982.
4. **Пул Л.** Работа на персональном компьютере: Пер. с англ. М.: Мир, 1986.
5. **Трейстер Р.** Персональная ЭВМ IBM PC: Пер. с англ. М.: 1986.
6. **Kemeny J. G., Kurtz T. E.** BASIC programming. N. Y. Wiley, 1971.
7. **Фаулджер М.** Программирование встроенных микропроцессоров: Пер. с англ. М.: Мир, 1985.
8. **Peterson S.**// Comput. Des. 1982. Vol. 21. N 10. P. 103–114.
9. **Dearnley P. A.**// Comput. J. 1982. Vol. 25, N 2. P. 253–256.
10. **Denning W., Essig H., Maos S.** The adaptation of virtual man-computer interface to users requirements in dialogs. Berlin: Springer, 1981.
11. **Шаповалов Ю. И., Шийка Я. В.**// Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1985. Т. 28, № 6. С. 74–76.
12. **Teskey F. N.** Principles of text processing. Chichester: Horwood, 1982.
13. **Первин Ю. А., Шевякова Т. К.** Динамические информационные системы на предприятии. М.: Статистика, 1975.
14. **Ван Тассел Ф.** Стиль, разработка, эффективность, отладка и испытание программ: Пер. с англ. М.: Мир, 1985.
15. **Николаев Ф. А., Фомин В. Н., Хохлов А. М.** Проблемы повышения достоверности в информационных системах. Л.: Энергоатомиздат, 1982.
16. **Ефременко Ю. А.**// Электронная техника. Сер. Экономика и системы управления. 1985. Вып. 4. С. 60–61.
17. **Абрамович С. Н., Бойко В. В., Бутрин Б. П. и др.**// Микропроцессорные средства и системы. 1985, № 2. С. 29–36.
18. **Кожарский В. Г., Орехов В. И.** Методы автоматизированного проектирования источников вторичного электропитания. М.: Сов. радио. 1985.
19. **Веников В. А.** Переходные электромагнитные процессы в электрических схемах. М.: Высшая школа, 1985.
20. **Чуа Л. О., Лин П. М.** Машинный анализ электрических схем: Пер. с англ. М.: Энергия, 1980.
21. **Дмитришин Р. В.** Оптимизация электронных схем на ЭВМ. Киев: Техника, 1980.

22. **Сигорский В. Г., Петренко А. И.** Алгоритмы анализа электронных схем. М.: Сов. радио, 1976.

23. **Калахан Д.** Методы машинного расчета электронных схем: Пер. с англ. М.: Мир, 1970.

24. **Мельников Н. А. Матричный метод** анализа электрических цепей. М.: Энергия, 1972.

25. **Vaske P. Elektrotechnik** unt BASIC–Rechnern (SHARP). Stuttgart: Teubner, 1984. **Т. 1. Grundlagen, Wechselstrom.**

26. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1978.

27. **Атабеков Г. И.** Теоретические основы электротехники. Ч. 1. М.: Энергия, 1978.

28. **Нейман Л. Р., Демирчян К. С.** Теоретические основы электротехники. Т. 1. – 3-е изд. Л.: Энергоиздат, 1981.

29. **Матханов П. Н.** Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи: Учебник для вузов. – 2-е изд. М.: Высшая школа, 1981.

30. **Бармаков Ю. Н., Бахов В. А., Ильин В. Н. и др.**// Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1981. Т. 24, вып. 6. С. 27–37.

31. **Брамеллер А., Аллан Р., Хэмэм Я.** Слабозаполненные матрицы: Анализ электроэнергетических схем: Пер. с англ. М.: Энергия, 1979.

32. **Павлюченок А. А., Стерлин А. М.** Программа решения линейных алгебраических уравнений со слабозаполненными матрицами коэффициентов. Инф. бюл. "Алгоритмы и программы". ВНТИЦ. М.: 1982, № 7, (51), с. 46.

33. **Седнев А.М.**// Электричество. 1980, № 8. С. 61–64.

34. **Щедрин Н. Н.** Упрощение электрических систем при моделировании. М.–Л.: Энергия, 1966.

35. **Дмитришин Р. В.** Оптимизация электронных схем на ЭВМ. Киев: Техніка, 1980.

36. **Непомнящий В. А.**// Кибернетика. 1984, № 2. С. 21–28.

37. **Головкин Б.А.**// Автоматика и телемеханика, 1968, № 7. С. 5–20.

38. **Гамм А. З.** Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976.

39. **Ушаков И. А., Литвак Е. И.**// Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1977, № 1. С. 72–80.

40. **Ellison D., Herschdorf I., Wilson J. T.**// Simulation, 1982. Vol. 38. N 5. p. 161–175.

41. **Miller R. R.**// Simulation, 1982. Vol. 38. N 6. p. 215–220.

42. **Геворкян Г. Х., Геворкян Э. Т.**// Тр. ВНИИЭМ. М.: 1966, т. 23, с. 97–101.

43. **Фокин Ю. А., Арсамаков И. И.**// Электричество, 1972, № 10, с. 23–28.

44. **Ильин В. И.** Машинное проектирование электронных схем. М.: Энергия, 1972.

45. **Геворкян Г. Х., Геворкян В. Х., Иванов А. И.**// Электротехническая промышленность. Сер. Электротехнические материалы. 1974, вып. 1 (54), с. 24–26.

46. **Фомин А. В., Борисов В. Ф., Чермошенский В. В.** Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Сов. радио, 1973.

47. **Гнеденко Б. В.** Курс теории вероятностей. М.: Физматгиз, 1961.

48. **Ермаков С. Н., Михайлов Г. А.** Курс статистического моделирования. М.: Наука, 1976.

50. **Шторм Р.** Теория вероятностей. Математическая статистика, статистический контроль качества: Пер. с нем. М.: Мир, 1970.

51. **Бусленко Н. П.** Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978.

52. **Сигорский В. П.** Анализ электронных схем. Киев: Гостехиздат УССР, 1964.

53. **Заболотни Р. А.**// Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1986, т. 29, № 6. С. 95–97.

54. **Сигорский В. П.**// Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1986, т. 29, № 6, с. 3–15.

55. **Геворкян Г. Х., Геворкян В. Х.**// Тр. ВНИИКЭ, т. 8, Ереван: 1976, с. 255–265.

56. **Башкис А. И.**// Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1986, т. 29, № 6, с. 98–99.

57. **Соболь И. М., Статников Р. Б.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981.

58. **Исаев И. П., Иньков Ю. И., Маричев М. А.** Вероятностные методы расчета полупроводниковых преобразователей. М.: Энергоатомиздат, 1983.

59. **Бахвалов Н. С.** Численные методы. М.: Наука, 1975.

60. **Калиткин Н. Н.** Численные методы. М.: Наука, 1978.

61. **Крылов В. П., Бобков В. В., Монастырный П. И.** Вычислительные методы. Т. 1. М.: Наука, 1976.

62. **Гильберт А.** Как работать с матрицами: Пер. с нем. М.: Статистика, 1981.

63. **Жуков Л. А., Стратан И. П.** Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем. М.: Энергия, 1979.

64. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1977.

65. **Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.** Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1980.

66. **Muench U., Bunzel E., Kunkel K.-H.**// Elektric, 1985. Bd 39. N 2. S. 42–474.

67. **Дьяконов В. П.** Справочник по алгоритмам и программам на языке БЕЙСИК для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987.

68. **W. Nerneter.** Berechnung elektischer Shaltungen mit dem Personal Computer. Carl Hanser Verlag: Munchen, 1987.

69. **Баласанян В. Э., Богдюкевич С. В., Шахвердов В. А.** Программирование на микроЭВМ "Искра-226". М.: Финансы и статистика, 1987.

70. **Морилл Г.** БЕЙСИК для персонального компьютера фирмы ИБМ: Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1987.

71. **Уолш Б.** Программирование на БЕЙСИКе: Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1987.

72. **Кетков Ю. Л.** Диалог с мини- и микроЭВМ. М.: Наука, 1988.

73. **Reinking E. F.** Mathematische Routinen VC20// Elektrotechnik/ Elektronik. Bracmschweig; Weisbaden: F. Vieweg and Sohn, 1983, VIII, s. 78.

74. **Jobert P.** Circuits electriques and systems. Methodes de calcul. Paris: Technique et Documentation. 1986. 206 p.

75. **Fusco V. F.** Microwave curcuits. Analysis and computer–aided disign. Englewood cliffs: Prentice–Hall, 1987.

76. **Doberenz W.**// Radio, Fernsehen, Elektronik, 1987. Bd. 36. N 7. S. 435–438.

Список опечаток

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
17	16 сверху	N	N1
17	17 сверху	2×10^p	$N2/10^p$
20	19 сверху	математерический	математический
56	8 снизу	5.558677	5.58677
174	18 снизу (4-я колонка таблицы)	APG	ARG
174	19 снизу (4-я колонка таблицы)	РУ * РУ	РХ * РУ

60 к.

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ